



Schlussbericht

zum Teilprojekt Herstellungstechnologien für Masterhologramme

**des Verbundprojekts VHTB – Verbesserte Herstellungstechniken für
Tageslichttaugliche Bildschirmhologramme**

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Schiller-Universität (FSU) Jena
Institut für Angewandte Physik (IAP)

Förderkennzeichen: 13N9433

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2008 bis 31.12.2011

Teil I

Kurze Darstellung

1. Ziel und Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Verbundvorhabens richtet sich an die Entwicklung eines tageslichttauglichen Rückstreuschirmes für die Anwendung der Aufprojektion durch elektronische Projektoren („Beamer“). Herkömmliche Rückstreuschirme haben einen geringen Kontrast und sind sehr empfindlich gegenüber Störlichtquellen. Außerdem ist die Abstrahlcharakteristik nicht auf den Zuschauerbereich zugeschnitten, sodass die Gesamteffizienz, durch die ungewollte Beleuchtung außerhalb dieses Bereiches, sinkt. Um diese Problematik zu lösen, sollte ein Rückstreuschirm basierend auf diffraktiven/refraktiven Strukturen entwickelt werden, der das einfallende Licht des Projektors winkeltgerecht in den gewünschten Zuschauerraum verteilt. Durch wellenlängenspezifische dreidimensionale Braggstrukturen in Photopolymeren wird der so generierte Rückprojektionsschirm unempfindlich gegenüber Störlicht und extrem hohe Kontrastwerte können erreicht werden. Die Entwicklung einer Technologie zur Generierung solcher Projektionsschirme auf großen Flächen ist eine große Herausforderung. Hierbei sollen die unterschiedlichen Kompetenzfelder der einzelnen Projektpartner synergetisch zusammengeführt werden.

Um dieses hohe Projektziel erreichen zu können, werden die Ergebnisse und Erfahrungen des BMBF-Vorläuferprojekt „Neue Herstellungstechniken für Tageslichttaugliche Bildschirmhologramme“ weiterverwertet. Die dort erkannten Probleme sollen in diesem Nachfolgeprojekt vertieft aufgearbeitet werden und bedürfen einer Reihe von Zusatzentwicklungen aller Projektpartner. Vor allem die Entwicklung eines marktfähigen und kostengünstigen Herstellungsprozesses auch größerer ($>1\text{m}^2$) Rückstreuschirme basierend auf dem Master-zu-Kopie Replikationsverfahren steht hier als Gesamtziel im Mittelpunkt.

Das Teilvorhaben der FSUJ hat das Ziel die Masterelemente für die holographische Skalierung herzustellen. Dies beinhaltet, aufgrund der hohen optischen Anforderungen der Elemente, die Entwicklung einer dafür geeigneten Technologiekette für die Herstellung der Master und die Entwicklung entsprechender Charakterisierungsmöglichkeiten.

1.1. Ziele der die FSUJ betreffenden Arbeitspakete

1.1.1. AP1: Herstellungsevaluierung

Dieses Arbeitspaket umfasst die Auswahl eines geeigneten Bildschirmhologrammdesigns unter Berücksichtigung technologischer Aspekte. Außerdem soll der herstellungstechnische Aufwand bezogen auf die Datenaufbereitung und die Schreibzeit der Elektronenstrahlolithographieanlage, sowie die technologische Machbarkeit in Bezug auf Elementgröße bzw. Topologie der Struktur (Strukturgröße, Aspektverhältnis) geprüft werden.

1.1.2. AP2: Aufbau eines Messplatzes

Um die Master charakterisieren zu können wird ein variabler RGB-Messplatz im Rahmen dieses Arbeitspaketes aufgebaut. Dieser ermöglicht eine winkeltreue, ortsaufgelöste und auf die Größe des Masters anpassbare Vermessung.

1.1.3. AP3: Technologieentwicklung für diffraktive Mikrostrukturen

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollen Herstellungsstrategien für diffraktive Mikrostrukturen entwickelt werden. Hierbei spielt vor allem die Datenvorbereitung für die Elektronenstrahlolithographieanlage eine große Rolle (Proximitykorrektur, Zerlegung der Strukturen, Dosiskorrektur). Vor allem die Schreibstrategie muss auf das jeweilige Problem angepasst und optimiert werden um eine gute Strukturtreue bei machbarer Schreibzeit zu erzielen. Zusätzlich ist die Machbarkeit von Multilevelstrukturen zu prüfen und eine geeignete Technologie auszuwählen. Zudem muss ein Prozess zum großflächigen Erzeugen der Strukturen erarbeitet und ein entsprechender Ätzprozess entwickelt werden. Die Strukturgröße (Strukturbreite, Strukturflanken, Profilformen) muss dabei charakterisiert werden um eine iterative Verbesserung des Herstellungsprozesses zu ermöglichen.

1.1.4. AP4: Technologieentwicklung für refraktive Mikrostrukturen

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollen Herstellungsstrategien für refraktive Mikrostrukturen entwickelt werden. Hierbei ist eine Herstellung mittels Elektronenstrahlolithographie oder mittels Laserschreiber möglich. Beide Ansätze sollen auf ihre Machbarkeit (Datenvorbereitung, Schreibstrategie, Strukturtreue, ...) untersucht werden. Dazu wird eine Charakterisierung der entstandenen Testmuster durchgeführt, die zu einer iterativen Optimierung der Prozesse führen soll.

1.1.5. AP5: Herstellung von Testhologrammen mit fixen Eyeboxen auf Basis verschiedener Herstellungsstrategien

Die aus den vorausgegangenen Arbeitspaketen gewonnenen Ergebnisse sollen hier zu ersten Masterhologrammen basierend auf der jeweiligen Herstellungstechnologie führen. Diese können bereits zum Test des holographischen Kopierverfahrens verwendet werden.

1.1.6. AP6: Herstellung von großen Masterhologrammen mit ortsabhängigen Eyeboxen auf Basis einer jeweilige ausgewählten Herstellungstechnologie

Basierend auf den Ergebnissen der vorausgegangenen Arbeitspakete, stellt die FSUJ im Rahmen dieses Arbeitspaketes ein Masterhologramm mit ortsabhängiger Eyebox zur Verfügung.

1.2. geplante Demonstratoren

Insgesamt sind 4 Masterhologramme CGH0 bis CGH3 mit zunehmender Spezialisierung und Funktionalität geplant.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Institut für Angewandte Physik der FSUJ besitzt eine langjährige Expertise auf dem Gebiet der Mikro- und Nanostrukturierung. Dies beinhaltet weitreichende Kenntnisse über Belichtungstechnologien wie das Elektronenstrahlschreiben und die Laserlithographie (in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena) sowie der notwendigen Kenntnis über diverse Strukturtransfermethoden, deren Modellierung und optischen Charakterisierung. Im Vorgängerprojekt VHTB konnte diese Expertise weiter ausgebaut werden. Es konnten hocheffektive Strahlformungselemente für die holographische Aufnahme von Bildschirmhologrammen hergestellt werden. Zudem konnte innerhalb eines DFG Projektes („3D Mikro- und Nanooptik“) in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Linhof die Technologie der Kontaktholographie von computergenerierten Masterhologrammen, die in diesem Projekt eine große Rolle spielt, erfolgreich getestet werden.

Die anspruchsvolle optische Konfiguration der geplanten Eyebox mit sehr hohen Abstrahlwinkeln führt zu sehr kleinen Strukturgrößen von etwa 300 nm. Die Untersuchung von Herstellungstechnologien zum Erzeugen solch kleiner Strukturgrößen im Wafermaßstab wird ein Schwerpunkt dieses Teilprojektes bilden. Dies gilt vor allem in Bezug auf die Schreibzeitproblematik der Elektronenstrahlolithographieanlage, sowie der Entwicklung einer geeigneten Technologie zum Strukturtransfer.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Absprache der Arbeitspakete erfolgte unter enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Die Masterhologramme wurden dabei zeitlich so festgelegt, dass aufeinander angewiesene Teilergebnisse termingerecht aufeinander abgestimmt werden konnten. Das Verbundprojekt begann am 01.07.2008, wobei sich der zeitliche Ablauf nach dem in der Vorhabensbeschreibung festgelegten Zeitplan richtete, in den gemeinsamen Treffen während der Projektlaufzeit, diskutiert und angepasst wurde.

		Arbeitsprogramm/Zeitplan											
Projektquartal		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	AP1	xxx	xxx									xxx	xxx
2	AP2		xxx	xxx						xxx			
3	AP3			xxx	xxx	Xxx	xxx	xxx					
4	AP4		xxx	xxx				xxx	xxx				
5	AP5			xxx	xxx								
6	AP6							xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	
10													
M1	CGH0 hergestellt		X										
M2	CGH1 hergestellt					X							
M3	CGH2 hergestellt							X					
M4	CGH3 hergestellt									X			
PE	finale CGH hergestellt												X

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Institut für Angewandte Physik besitzt eine große Expertise im Bereich der refraktiven und diffraktiven Mikro- und Nanooptik. Dies betrifft vor allem die Kenntnis über eine Vielzahl von herstellungsrelevanten Technologien (Elektronenstrahlschreiben, Photolithographie, Laserlithographie, Ionen- und Plasmaätzen, ...) und Charakterisierungsmöglichkeiten [1,2]. Zudem wird seit Jahren auch in Bezug auf wellenoptisches Design und Modellierung am Institut gearbeitet [3].

In dem Vorläufer-BMPF-Projekt NHTB konnte diese Expertise, wie bereits erwähnt, weiter ausgebaut werden. Das Prinzip von gestapelten wellenlängenselektiven Reflexions-CGHs, generiert mittels holographischer Kontaktkopie von entsprechenden computergenerierten Masterhologrammen, konnte für die Erzeugung komplexer Farbbilder bereits aufgezeigt werden [4]. Damit konnte ein Grundstein für die Bearbeitung dieses Projektes gelegt werden. Jedoch bestehen wesentliche Unterschiede zwischen der Aufgabe der Bildgenerierung und der Generierung einer ortsabhängigen Eyebox, wie dies im Rahmen des Projekts geplant war. Daher waren umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet notwendig.

[1] B. Schnabel, E. - B. Kley, "Evaluation and suppression of systematic errors in optical subwavelength gratings", SPIE Vol. 4231, Chengdu, China, 2000

- [2] E.-B. Kley, M. Cumme, L. Wittig, A. Tuennermann, "Fabrication and properties of refractive microoptical profiles for lenses, lens-arrays, and beam shaping elements", SPIE Vol. 4231, Chengdu, China, 2000
- [3] Cumme, M. and Kley, E.-B. (1999) "Refractive beam shaping elements for complicated intensity distributions", Proceedings of the 11th International Meeting on Electro-optics and Microelectronics in Israel, Tel Aviv, Annals of the Israel Physical Society Vol **14**, pp. 165-168.
- [4] T. Kämpfe, E.B. Kley, A. Tünnermann, "Multicolor image generation by a stratified, diffractive optical element" EOS Annual Meeting, 17.–19. Oktober 2006, Paris, Topical Meeting on Micro-Optics, TOM4 (Diffractive Optics and Optical MEMS)

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit aller Projektpartner wurde durch regelmäßige Treffen koordiniert, in denen der Projektverlauf konstruktiv diskutiert und eventuelle Anpassungen der Aufgabenstellung oder des zeitlichen Verlaufs vorgenommen wurden. Kleinere organisatorische Absprachen wurden entweder bilateral telefonisch abgesprochen oder via Telefonkonferenz diskutiert.

Die Ziele des Teilprojektes konnten nur durch eine enge Zusammenarbeit mit LightTrans, Linhof und der Fachhochschule München erreicht werden. Mit LightTrans fand ein reger Informationsaustausch zur Problematik der Schreibzeitoptimierung und Machbarkeit der Masterhologramme statt. Besonderer Schwerpunkt lag hierbei auf der Optimierung des Datentransfers und des Schreibzeitregimes der Elektronenstrahlolithographieanlage. So konnte die Herstellbarkeit mit der optischen Funktionalität der Elemente in Einklang gebracht werden und eine großflächige Generierung im Wafermaßstab erfolgen.

Die erforderlichen Spezifikationen der Masterhologramme wurden in Zusammenarbeit mit LightTrans unter den Vorgaben von Linhof abgesprochen und auf den Prozess der holographischen Kontaktkopie zugeschnitten. Zur Problematik der holographischen Skalierung gab es einen regen Informationsaustausch zwischen der FSUJ, Linhof und der Fachhochschule München.

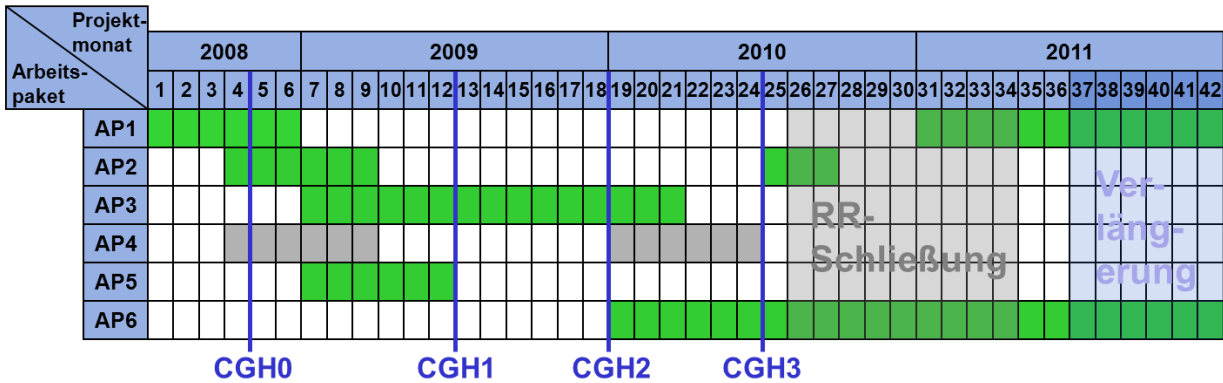
Der visuelle Eindruck wurde in Zusammenarbeit mit Jenoptik LDT/Laser in Bezug auf Homogenität und Speckleproblematik ausgewertet.

In Bezug auf die endgültige Verwertbarkeit des Rückprojektionsschirmes und die Festlegung des finalen Designs fanden während der Projekttreffen oder unter telefonischer Absprache zahlreiche Diskussionen mit EADS-CRC und AUDI als Endverwerter statt.

Teil II

Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse



CGH0/1: Testelemente zum Abstecken der möglichen Parameterräume ✓

CGH2: Element für definierte Zielparameter bei fixer Eyebox (mit Vorverzerrung) ✓

CGH3: Element für definierte Zielparameter bei variabler Eyebox (+ Verkippung) ✓

Abb.1: Angepasster Arbeitsplan des Teilprojektes mit den Terminen für die zunehmend spezialisierten Masterhologramme. Der Zeitraum der Reinrauschließung und der kostenneutralen Verlängerung ist farblich hervorgehoben.

CGHs	on	off	2	3	Verzerrung	Verkippung	Design	Wann
	axis	level						
CGH0_1 (global)	×		×				FSU	23.01.09
CGH0_2 (global)	×		×				FSU	23.01.09
CGH0_3 (global)	×		×				FSU	23.01.09
CGH0_4 (global)	×		×				FSU	23.01.09
CGH0_5 (lokal)	×		×				LightTrans	26.05.09
CGH1 (global)	×			×	×	×	FSU	16.10.09
CGH2_0 (lokal)		×		×			LightTrans	23.02.10
CGH2_1 (lokal)		×		×	×		LightTrans	22.03.10
CGH2_2 (global)		×		×	×		FSU	19.08.10
CGH3_0 (global)		×		×	×	×	FSU	23.11.10
CGH3_lokal		×		×	×	×	LightTrans	09.11.11
CGH3_global		×		×	×	×	LightTrans	01.12.11

Abb. 2: Auflistung aller durch die FSUJ hergestellten Masterhologramme.

Der Arbeitsplan konnte durch die FSUJ, bis auf geringe Verzögerungen, eingehalten werden und die jeweiligen Master CGH0 bis CGH3 nahezu termingerecht zur Verfügung gestellt werden. Hervorzuheben ist hierbei der Sachverhalt, dass die FSUJ zu ihrem eigentlichen Kompetenzbereich der Herstellung zusätzlich über die angedachten Projektaufgaben hinaus die Aufgabe des Designs einiger Elemente übernommen hat. Dabei lag der Schwerpunkt im Design auf die Verwendung des globalen Ansatzes.

Ein anderer wesentlicher Aspekt war die Verwendung eines am Institut für Angewandte Physik der FSUJ neu entwickelten effektiven Medien Ansatzes, der die herkömmliche aufwendige Multilevel-Technologie ablösen konnte. Der Vorteil an diesem Ansatz ist, dass man keine unterschiedlichen Layer bei der Belichtung benötigt, sondern ein binäres, also zweistufiges Element in einem Belichtungsschritt erzeugen kann. Vor allem die hohen Abstrahlwinkel der gewünschten Eyebox erforderten diesen neuen innovativen Weg, da eine solche Konfiguration durch die daraus folgenden kleinen Strukturgrößen mit herkömmlichen Herstellungstechniken kaum zu realisieren sind.

Aufgrund einer allgemeinen Verzögerung des Projektvorhabens und der Schließung der von uns verwendeten Reinräume von August 2010 bis Ende April 2011, kam es unter Absprache aller Projektpartner zu einer kostenneutralen Verlängerung des Teilprojektes der FSUJ von 6 Monaten, der stattgegeben wurde. So war es der FSUJ möglich notwendige Teilergebnisse, die für das Endelement CGH3 entscheidend waren, abzuwarten und in Kooperation und Abstimmung mit LightTrans, Linhof, EADS und der Fachhochschule München miteinzuarbeiten. Ein detaillierter Überblick über alle Arbeitspakete wird im Folgenden aufgezeigt.

1.1. AP1: Herstellungsevaluierung

1.1.1. Verwendung des lokalen Gitter und des globalen Design Ansatzes

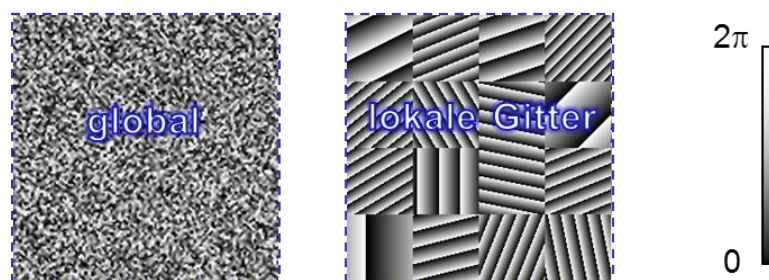


Abb. 3: Visualisierung des globalen und lokalen Gitter Ansatzes.

Als diffraktive Design-Ansätze wurden im Rahmen dieses Projektes zwei unterschiedliche Wege parallel verfolgt. Zum einen der Ansatz der „lokalen Gitter“, der vor allem von LightTrans vorangetrieben wurde und der „globale Ansatz“, der von Anbeginn als Zusatzleistung von der FSUJ untersucht wurde, wobei die FSUJ zusätzlich zur Herstellung auch das Design der Masterhologramme übernahm.

Der lokale Gitter Ansatz beruht auf der Anordnung verschiedener Gitterzellen, wobei jede einzelne Gitterzelle einen Punkt im Fernfeld realisiert. Durch Anordnung

verschiedener Gitterzellen mit unterschiedlichen Gitterperioden und Winkelorientierungen zu einer Diffusorzelle, kann ein bestimmter Raumwinkelbereich ausgeleuchtet werden. Setzt man nun verschiedene Diffusorzellen zusammen, wobei man die beinhalteten Gitterzellen jeweils statistisch durchmischt, erzielt man eine homogene Intensitätsverteilung, wie dies im Projekt angestrebt ist, in der Bildebene. Mögliche unerwünschte Gittereffekte durch die Anordnung der Gitter- und Diffusorzellen, sowie die Machbarkeit einer für die Rückprojektion notwendigen Auflösung müssen hier jedoch näher untersucht werden.

Für die Herstellbarkeit ergeben sich folgende Überlegungen: Jedem Bildpunkt der Eyebox kann eine lokale Gitterzelle zugeordnet werden. Diese Gitterzellen müssen dann statistisch abgesetzt werden. Dadurch sind der Rechenaufwand und auch der Aufwand für Datenvorbereitung zur Belichtung mittels Elektronenstrahlithographieanlage nicht sehr hoch. Dies sind klare herstellungstechnische Vorteile. Die Strukturapproximation der lokalen Gitter durch die Elektronenstrahlithographieanlage ist aufgrund der vielen notwendigen Winkelorientierungen nicht günstig, da die Anlage auf dem variable shaped beam - Prinzip basiert und somit nur wenige simple Geometrien belichten kann. Je besser die Struktur approximiert werden soll, desto feiner muss die Zerlegung werden und damit steigt die Belichtungszeit. Eine genauere Untersuchung zu diesem Thema wurde unter AP4 durchgeführt.

Globale Elemente werden durch einen iterativen Fourier-Transform-Algorithmus designt und ähneln eher einer „Salz-und-Pfeffer-Struktur“. Die Design-Rechenzeit und auch der Aufwand für die Aufbereitung der Daten zum Elektronenstrahlschreiben wachsen somit mit zunehmender geforderter Größe und Auflösung der Elemente. Jedoch lässt sich dieser pixelierte Ansatz mit hoher Strukturtreue elektronenstrahlschreiben.

1.1.2. Binär oder Multilevel

Eine binäre, also auf zwei Höhenstufen basierende, Technologie lässt sich im Bereich der diffraktiven Optik, speziell der computer-generierten Hologramme relativ kostengünstig umsetzen. Zur Herstellung ist nur ein elektronenstrahlithographischer Belichtungsschritt notwendig. Die so generierte binäre Resistmaske kann dann durch einen geeigneten Ätzprozess in das Substrat übertragen werden.

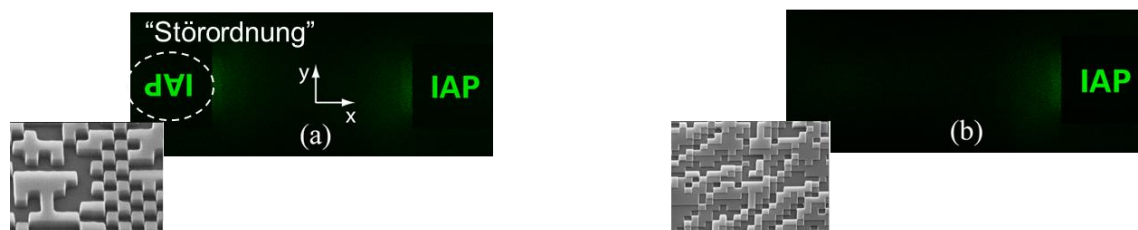


Abb. 4: Binäres Element mit Spiegelordnung (a) und 4-level Element bei welchem diese Störordnung unterdrückt werden kann (b).

Allerdings sind solche binären Elemente in ihrer Effizienz limitiert, da ein oft ungewünschtes Spiegelbild auftritt, in dem sich die Hälfte der Gesamtintensität befindet (Abb.4). Es lassen sich somit nur zum Mittelpunkt punktsymmetrische

Intensitätsverteilungen (z.B. Rechteck, Raute, Kreis ...) mit solchen binären Elementen effizient generieren.

Als erstes Testelement (CGH0) wurde ein Rückstreuelement mit einer punktsymmetrischen optischen Funktion von der FSUJ design und hergestellt, wie dies genauer unter AP5 beschrieben wird. An diesem Element konnten klar die Vorteile der binären Technologie im Punkt Strukturgröße (kleinste Strukturgröße 312nm) und Schreibzeit (ca. 5h für 11,4cm x 11,4cm) demonstriert werden.

Für das geplante off-axis Setup, wie es für den Enddemonstrator angedacht war, waren die vereinbarten Zielparameter des Schirms (<5% in 0. Ordnung, >50% in Eyebox) mit einem binären Element nicht mehr zu erreichen. Um das Licht in einer Bildordnung zu bündeln, benötigt man zusätzliche Phasenstufen. Je größer die Anzahl dieser Stufen ist, desto höher ist die Effizienz des diffraktiven Elementes. Diese unterschiedlichen Phasenstufen werden im Allgemeinen durch eine Variation der Elementhöhe hervorgerufen. Die Fabrikation solcher Elemente ist sehr aufwendig und beschränkt sich meist nur auf eine geringe Anzahl (i.A. 4 Level, Abb.4b) von Höhenstufen.

1.1.3. Effektiver Medien Ansatz

Die konventionelle Multileveltechnologie erschien aufgrund ihrer hohen Komplexität zu kostenintensiv. Hierbei wären mehrere binäre Belichtungsschritte und anschließende Ätzprozesse notwendig, wobei die verschiedenen Belichtungsebenen mit hoher Genauigkeit aufeinander justiert werden müssen. Diese Vorgehensweise gestaltet sich vor allem in Bezug auf die gewünschten kleinen Strukturgrößen schwierig, die für die hohen Abstrahlwinkel der Eyebox benötigt werden. Daher wurde ein alternativer Ansatz basierend auf einem an der FSUJ entwickelten effektiven Medien Ansatz entwickelt.

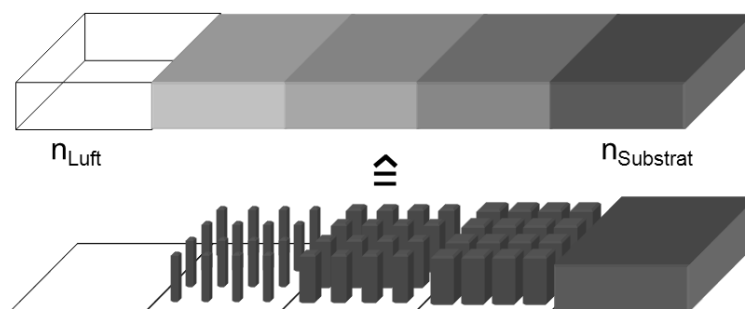


Abb. 5: Prinzipdarstellung des effektiven Medien Ansatzes. Ein gradueller Brechungsindexverlauf kann durch die geeignete Platzierung von Subwellenlängenstrukturen erzeugt werden.

Das Wirkprinzip dieses Ansatzes lässt sich wie folgt beschreiben: Verwendet man Strukturen, deren Abstand und laterale Ausdehnung viel kleiner als die verwendete Wellenlänge ist, so können sie vom Licht nicht mehr „aufgelöst“ werden. Es ergibt sich folglich eine Art Mischindex, der zwischen dem des verwendeten Materials und Luft liegt und sich durch die laterale Strukturausdehnung einstellen lässt (Abb.5).

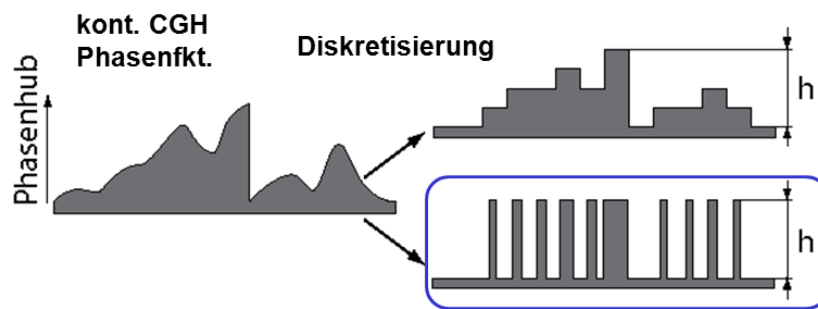


Abb. 6: Prinzipdarstellung des effektiven Medien Ansatzes. Statt einem Höhenprofil wird eine binäre Subwellenlängenstruktur verwendet.

Das Höhenprofil eines diffraktiven Elementes lässt sich folglich in eine binäre Subwellenlängenstruktur umwandeln (Abb.6). Dieser Ansatz ermöglicht eine effiziente Herstellung im Wafermaßstab bei gleichzeitig kleinen Strukturgrößen.

Genauere Details zum Design und zur Herstellung von Elementen basierend auf diesem effektiven Medien Ansatz werden im Kapitel 1.5. zu AP5 dargestellt.

1.2. AP2: Aufbau eines Messplatzes zur optischen Charakterisierung

Der Aufbau wurde mit 3 Lasern unterschiedlicher Wellenlängen (RGB) und entsprechenden dichroitischen Spiegeln realisiert. Der so resultierende „weiße“ Strahl wurde dann durch eine geeignete Kombination von Sammellinsen aufgeweitet, sodass die strukturierte CGH-Fläche gut ausgeleuchtet werden konnte. Das CGH wurde seinerseits dreh- und kippbar gelagert und ließ sich horizontal sowie vertikal einjustieren. Dies ermöglichte eine hohe Flexibilität bei der Messung, wobei das optische Setup schnell auf neue Projektionsgeometrien angepasst werden konnte. Die Messung der Effizienz erfolgte entweder indirekt mittels einer Kamera oder direkt mit Hilfe einer Ulbrichtkugel.

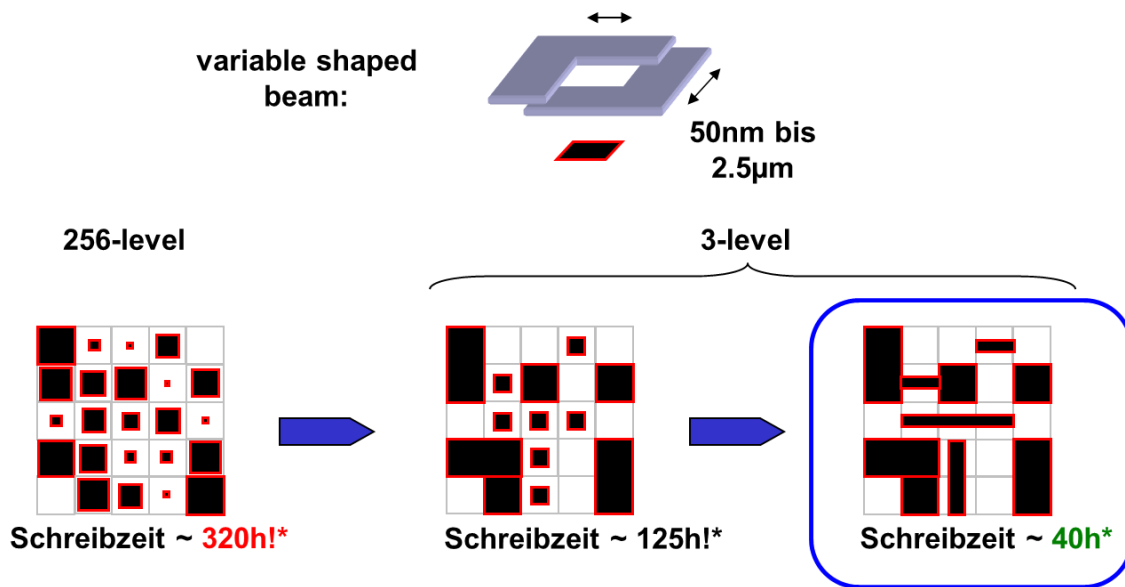
1.3. AP3: Technologieentwicklung für diffraktive Mikrostrukturen

Wie in AP1 in Kapitel 1.1. beschrieben, wurde sich aufgrund der speziellen Anforderungen des Zielelementes (hohe Abstrahlwinkel → kleine Strukturgrößen, hohe Effizienz → Multilevel-Technologie, Strukturierung im Wafermaßstab) auf den neuartigen effektiven Medien Ansatz konzentriert. Ziel war hierbei vor allem die Schreibzeit der Elektronenstrahlolithographieanlage durch eine geeignete Zerlegung und Schreibstrategie zu optimieren. Da die Schreibzeit linear mit der Anzahl der Belichtungsshots skaliert, ist das Ziel eben diese zu reduzieren. Zusätzlich erfolgten zahlreiche Belichtungs- und Ätztests um die kleinen Strukturgrößen mit hohem Aspektverhältnis herstellen zu können.

Die Belichtungsstrategie wurde hierbei jeweils auf den globalen und lokalen Designansatz zugeschnitten.

1.3.1. Schreibzeitoptimierung globaler Ansatz

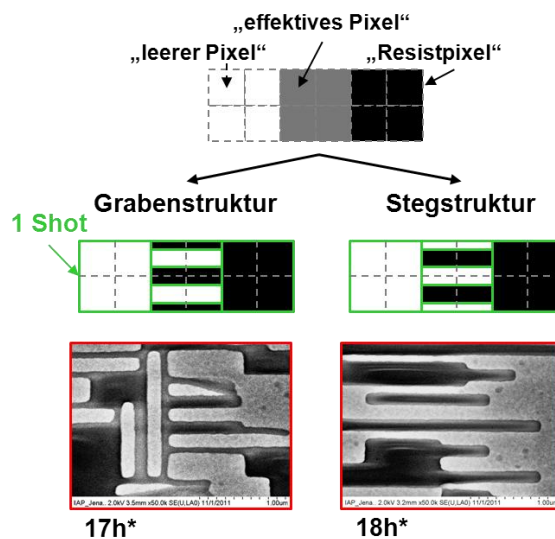
Der globale Ansatz ist durch seinen pixelierten Charakter sehr gut auf das Schreibregime des variable-shaped-beam der Elektronenstrahlolithographieanlage anwendbar. Allerdings gilt es hier durch eine günstige Wahl der Strukturparameter die Anzahl der Belichtungsshots und somit die Schreibzeit zu reduzieren.



* für 100mm x 100mm DOE-Größe

Abb. 7: Prinzipdarstellung zur Schreibzeitersparnis unter Verwendung von Stegstrukturen. Ein Belichtungsshot ist hierbei durch die rote Umrandung gekennzeichnet.

Wie man Abb.7 entnehmen kann, ist es durch die Verwendung von 3 effektiven Phasenstufen unter Berücksichtigung eines „Steg-Designs“ möglich die Schreibzeit um einen Faktor 8 vom ursprünglichen 256-Level Säulen-Design zu reduzieren.



* abgeschätzte Belichtungszeit für 88 x 49.5 mm²

Abb. 8: Vergleich eines „Graben-Designs“ (links) zu einem „Steg-Design“ (rechts) und daraus resultierende Belichtungsergebnisse (REM-Bilder unten).

Bei einem Steg-Design wird um den Steg „drumherum“ belichtet. Dies führt, wie im Abb.8 erkenntlich, zu einer etwas höheren Schreibzeit als bei einem Graben-Design. Allerdings sind die resultierenden Strukturen wesentlich stabiler, da es beim Grabendesign, bei welchem der Graben direkt belichtet wird, zu sehr schmalen Stegen kommt, die schnell instabil werden.

1.3.2. Schreibzeitoptimierung lokaler Ansatz

Eine gute Approximation der Phasenfunktion basierend auf einem lokalen Gitter Design ist aufgrund der vielen notwendigen Winkorientierungen und der kleinen Gitterperioden schwierig zu realisieren, vor allem, wenn man eine machbare Schreibzeit erhalten will. Um eine mit dem globalen Ansatz vergleichbare Schreibzeit zu erhalten wurden deshalb zwei Bedingungen eingeführt: Der Füllfaktor des Subwellenlängengitters der mittleren effektiven Phasenstufe wurde auf 0.5 festgelegt, d.h. der Gittersteg ist genauso breit wie der Gittergraben. Dies ermöglicht eine gleichzeitig gute Approximation der gegenüberliegenden Kante ohne zusätzliche Belichtungsshots. Dies ist ohne weiteres anwendbar, da der optimale Füllfaktor mit 0.47 nur geringfügig niedriger ist und schon herstellungsbedingt kaum mit auflösbaren Effekten diesbezüglich zu rechnen ist. Um eine gute Strukturapproximation zu gewährleisten, wurde als 2. Schritt ab einer Winkorientierung von 45° die Stegorientierung gedreht (Abb.9 unten).

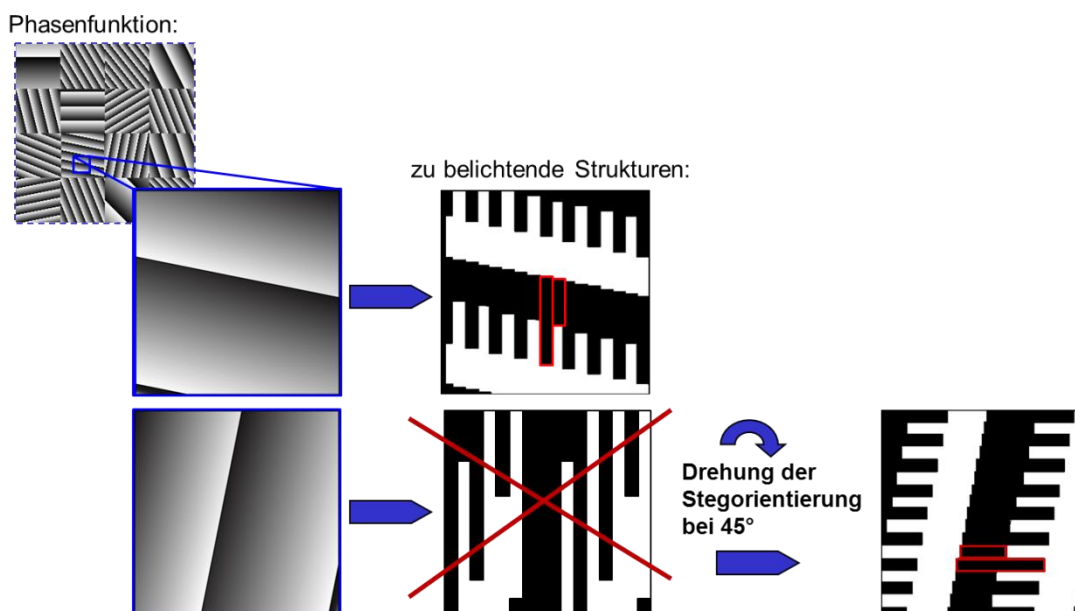


Abb. 9: Umwandlung der Phasenfunktion, resultierend aus dem lokalen Gitter Design, in elektronenstrahlolithographisch machbare Strukturen. Die rot umrandeten Bereiche kennzeichnen dabei jeweils einen Belichtungsshot.

Des Weiteren ließ sich die Datenübergabe zwischen LightTrans und der FSUJ optimieren. Die anfängliche Übergabe der Phasenfunktionen als BMP-Dateien erwies sich aufgrund der riesigen Datenmengen und auftretenden Sampling-Artefakten als ungeeignet und wurde durch eine Übergabe im CSV-Datenformat abgelöst. Hierbei wurden einfach die Parameter der Superzelle (Lage der Subzelle, Phasenshift, Periode, Winkel) tabellarisch aufgelistet.

1.4. AP4: Technologieentwicklung für alternative refraktive Mikrostrukturen

Zu diesem Arbeitspaket wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IOF erste Versuche mit dem Laserschreiber durchgeführt. Aufgrund des hohen Erfolgspotentials des neuen effektiven Medien Ansatzes, wurde dieser Ansatz jedoch schnell zum Schwerpunkt der Technologieentwicklung.

1.5. AP5: Herstellung von Testhologrammen mit fixen Eyeboxen auf Basis verschiedener Herstellungsstrategien

1.5.1. Optisches Setup

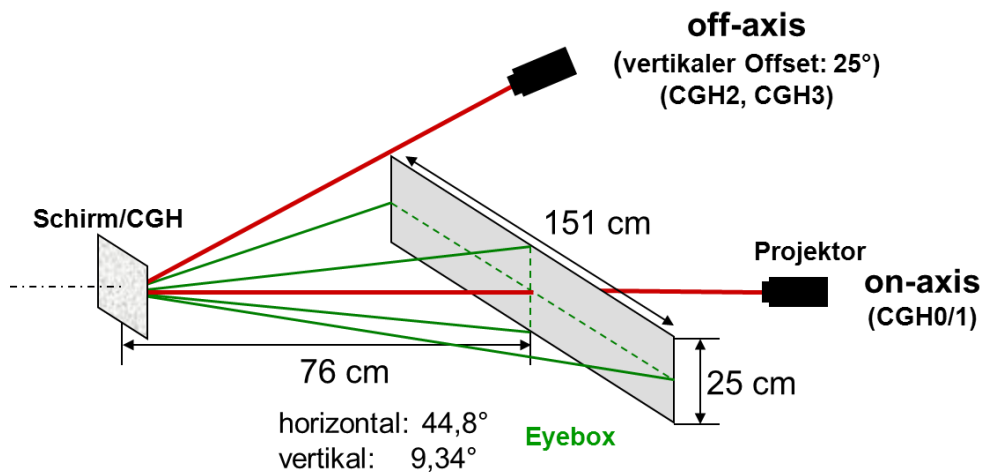


Abb. 10: Im Rahmen des Projekts geplante on- und off-axis Konfiguration.

Im Rahmen des Projektes wurden zwei optische Konfigurationen der Rückstreuungsfunktion der Eyebox gewählt (Abb.10). Als erster Ansatz wurde ein on-axis Setup (für CGH0/1) gewählt, da dies herstellungstechnisch mit einem binären Ansatz verfolgt werden konnte. Durch den hohen horizontalen Abstrahlwinkel lag hier die große Herausforderung in der Herstellung der dafür notwendigen kleinen Strukturgrößen.

Da die erste Konfiguration für den geplanten Anwendungsfall nicht machbar ist, wurde ein off-axis Setup (für CGH2/3) mit einem Einstrahlwinkel des Projektors von 25° gewählt. Dadurch wurde sichergestellt, dass sich die 0. Ordnung, also der direkte Rückreflex des Projektors, außerhalb der Eyebox befindet.

1.5.2. Vorverzerrung der Eyebox

Da die optische Funktion eines CGHs relativ zu den Ortsfrequenzen dargestellt wird, ist es notwendig, bei einer Projektion auf eine parallel zum CGH liegende Ebene, eine Vorverzerrung durchzuführen, da ansonsten vor allem bei hohen Raumwinkeln eine zunehmende Kissenverzerrung auftritt. Die Vorverzerrung betrifft sowohl Form als auch Intensitätsverteilung der gewünschten Zielfunktion, wie dies in Abb.11 dargestellt wird. Um dies zu gewährleisten, wurde an der FSUJ ein entsprechender Algorithmus entwickelt und angewendet.

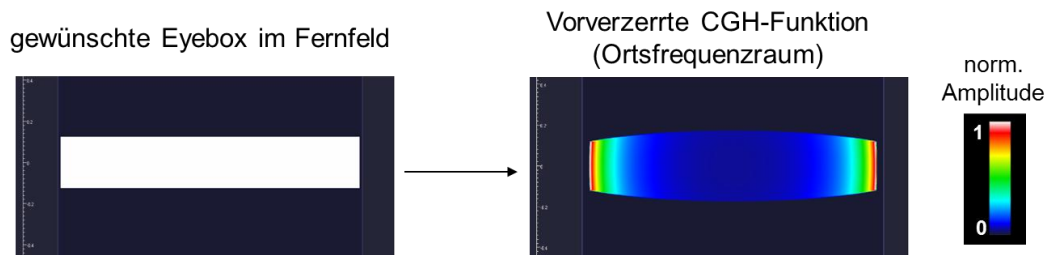


Abb. 11: Visualisierung des Algorithmus zur Vorverzerrung.

1.5.3. CGH0

Bei CGH0 handelt es sich um ein binäres Element, welches für eine on-axis Konfiguration für eine Wellenlänge von 532nm von der FSUJ designt und hergestellt wurde. Geplant war hierbei ein Reflexionselement, welches aus einem mit Cr überschichteten strukturierten fused silica Substrat besteht. Die Pixelgröße und damit kleinste Strukturgröße beträgt 312nm (Abb.12). Dieser Wert ergibt sich aus der Konfiguration der Eyebbox, wobei darauf geachtet wurde, dass keinen höheren Bildordnungen entstehen können. Die Zieltiefe des Elementes beträgt bei Anwendung in Reflexion 133nm. Die Schreibzeit der Elektronenstrahlolithographieanlage betrug für eine Fläche von 11,4cm x 11,4cm ca. 5h, was ein durchaus akzeptabler Wert ist.

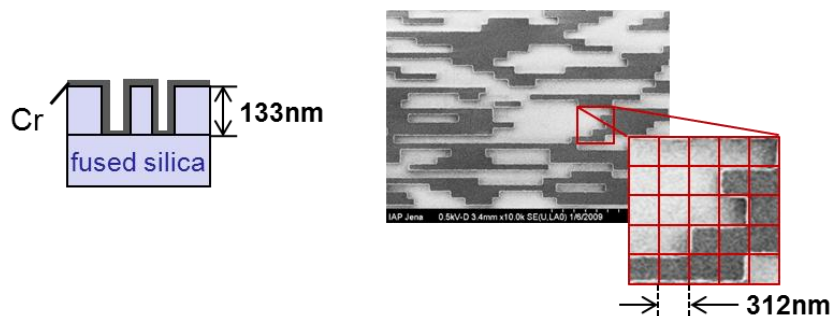


Abb. 12: Zusammensetzung und Rasterelektronenmikroskopaufnahme von CGH0.

Zudem wurde bei diesem Element die notwendige Elementarzellengröße, d.h. Gesamtgröße der CGH-Funktion bestimmt. Hierzu wurden 4 Elemente mit einer Größe von 5,75cm x 5,75cm mit jeweils unterschiedlichen Elementarzellengrößen (64x64 Pixel, 512x512 Pixel, 1024x1024 Pixel und 4096x4096 Pixel) hergestellt und der visuelle Eindruck bei Beleuchtung mit einem Pocket-Beamer beurteilt (Abb.13). Es wird deutlich, dass erst bei einer Elementarzellengröße von 4096x4096 Pixeln keine sichtbaren Farbeffekte mehr auftreten, die durch die begrenzte Anzahl von Beugungsordnungen hervorgerufen werden.

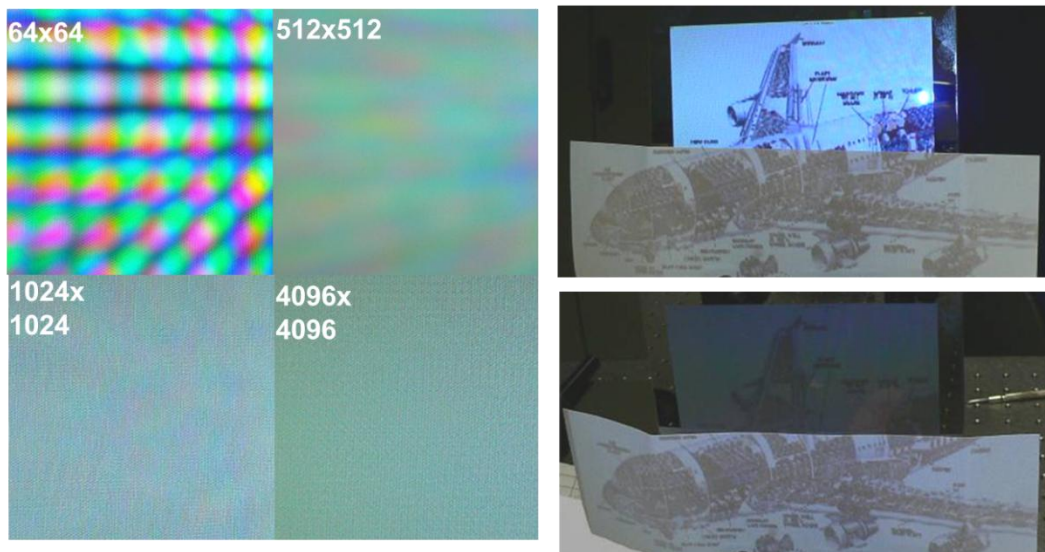


Abb. 13: Visueller Eindruck bei Beleuchtung mit einem Pocket Beamer. Es ist ein gutes Kontrastverhalten zu erkennen, wenn man die rückgestreute Verteilung innerhalb der Eyebox (rechtes Bild oben) und außerhalb der Eyebox (rechtes Bild unten) mit Papier vergleicht.

Im Punkt Kontrastverhältnis sind die Ergebnisse des Elementes sehr positiv einzuschätzen. Vergleicht man die rückgestreute Verteilung mit Papier, so sieht man innerhalb der Eyebox eine deutlich höhere Effizienz, also ein wesentlich helleres Bild im Vergleich zu Papier und außerhalb der Eyebox ein wesentlich dunkleres Bild verglichen mit Papier.

1.5.4. CGH1

Um eine kippende, also nicht punktsymmetrische, Eyebox zu generieren, wie dies im Projekt geplant war, wurde mit CGH1 ein Multilevel-Element erforderlich. Dieses wurde, wie unter AP3 in Kapitel 1.3. erläutert für eine Wellenlänge von 532nm durch die FSUJ designt und hergestellt. Bei diesem Element wurde noch nicht der endgültige Algorithmus für die Vorverzerrung verwendet. Vielmehr wurde ein vereinfachter Ansatz gewählt: Die CGH-Funktion wurde für den Fall einer symmetrischen on-axis Eyebox berechnet und die Verschiebung der Eyebox je nach notwendigen Kippwinkel wurde durch eine Multiplikation der CGH-Funktion mit einer um diesen Winkel geneigten ebenen Welle realisiert (Abb.14).

CGH1 war als ein effektives 3-level Element konzipiert, welches aus einer 300nm dicken strukturierten Resistschicht (FEP 171), als optisch aktive Schicht, auf einem mit Cr-beschichteten Si-Wafer besteht. Für die mittlere effektive Phasenstufe wurde ein Füllfaktor von 0.47 verwendet. Die Pixelgröße beträgt wie bei CGH0 312nm und die Strukturtiefe 300nm.

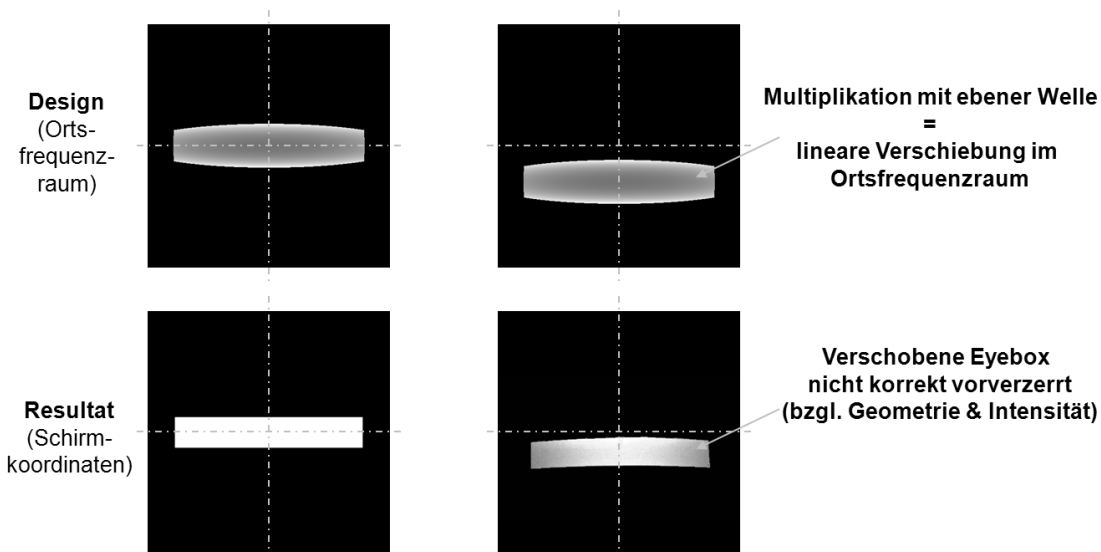


Abb. 14: Visualisierung der Verkipfung der Eyebox. Durch den hier verwendeten vereinfachten Algorithmus wird die verschobene Eyebox noch nicht korrekt vorverzerrt wiedergegeben.

Um die Strukturtreue der nur wenige 100nm breiten Stege gewährleisten zu können, waren einige Belichtungstests zur Optimierung der Parameter (Berücksichtigung des Proximityeffektes, Ermittlung der geeigneten Dosis, ...) notwendig. Die Belichtungszeit betrug für eine Fläche von 10,4cm x 10,4cm ca. 32h und ist damit wesentlich größer als bei einem zweistufigen Element wie CGH0. Die zusätzliche Phasenstufe, realisiert durch eine Subwellenlängenstruktur, erhöht erheblich die erforderliche Anzahl von Belichtungsshots der Elektronenstrahlolithographieanlage.

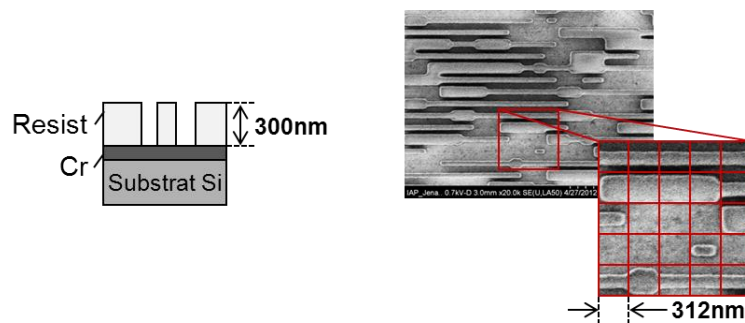


Abb. 15: Zusammensetzung und Rasterelektronenmikroskopaufnahme von CGH1.

Die Ergebnisse dieses ersten effektiven 3-level Elementes waren sehr vielversprechend vor allem was die Unterdrückung der ungewünschten Spiegelordnung anbelangt (Abb.16).

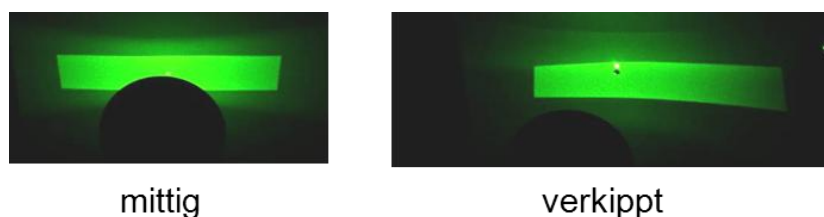


Abb. 16: Optische Rückstreuungsfunktion von CGH1 bei einer Beleuchtungslaserwellenlänge von 532nm. Es ist gut zu erkennen, dass die unerwünschte Spiegelordnung gut unterdrückt ist.

1.5.5. CGH2

Bei CGH2 handelt es sich um das erste off-axis Element, welches einen Einfallswinkel von 25° vom Projektor berücksichtigt. Zudem wurde bei diesem Element die Intensitätsverteilung der Eyebox korrekt vorverzerrt.

Zum Erreichen der Zielkonfiguration wurden zwei Designansätze verfolgt: Der lokale Gitter Ansatz durch LightTrans und der globale Ansatz, wie bereits bei CGH0/1, von der FSUJ. Dies ermöglichte einen ersten Vergleich beider Designansätze. Die Umwandlung der Phasenfunktionen in ein effektives 3-level Element und dessen Herstellung wurde an der FSUJ durchgeführt.

1.5.5.1. CGH2_1 (lokaler Ansatz)

Die Umsetzung der von LightTrans designten Phasenfunktion in ein effektives 3-level Element wurde, wie in Kapitel 1.3.2. dargestellt, vorgenommen. Die Periode des Subwellenlängengitters beträgt hierbei 300nm. Da Cr allerdings eine sehr hohe Absorption hat, wurde für dieses Element Aluminium als Reflexionsschicht verwendet um die Gesamteffizienz zu steigern. Als optisch aktive Schicht dient, wie bei CGH1, eine 300nm dicke ausgehärtete Resistschicht. Die Belichtungszeit der Elektronenstrahlolithographieanlage betrug für eine Fläche von 5,8cm x 5,8cm ca. 33h.

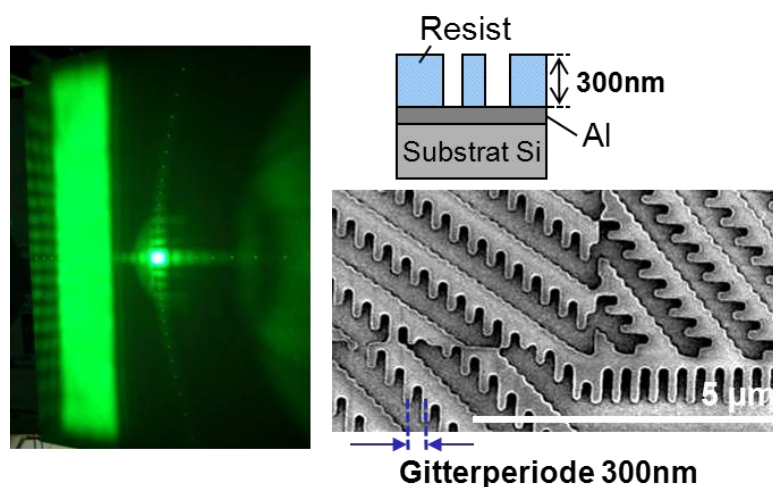


Abb. 17: Optische Rückstreuungsfunktion von CGH2_1 bei einer Beleuchtungslaserwellenlänge von 532nm (links) und Zusammensetzung und Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Elementes (rechts).

Betrachtet man die optische Rückstreuungsfunktion von CGH2_1 (Abb. 17, links) so erkennt man eine recht homogene, zum Rand etwas verwaschene, Eyebox. Das unerwünschte Spiegelbild ist kaum noch zu erkennen und in der 0. Ordnung befinden sich noch ca. 6% des einfallenden Lichtes. Auffällig sind vor allem die regelmäßigen Strörordnungen um die 0. Ordnung, sowie am linken Rand der Eyebox. Diese Strörordnungen sind auf das regelmäßige Raster der Gitterzellen zurückzuführen und durch den verwendeten Designansatz bedingt.

1.5.5.2. CGH2_2 (globaler Ansatz)

Das Design von CGH2_2 erfolgte unter Berücksichtigung des globalen Ansatzes und wurde von der FSUJ erarbeitet. Aufgrund der höheren Abstrahlwinkel, die bei einer Berücksichtigung der Kugelwelle des Projektors notwendig sind, wurde bereits bei diesem Element mit einer dafür notwendigen kleineren Pixelgröße von 290nm gearbeitet. Da der bisher für CGH1 und CGH2_1 genutzte Resist im Punkt Stabilität und auch von seinen optischen Eigenschaften (geringe Absorption im VIS-Bereich) nicht optimal als optisch aktive Schicht geeignet ist, wurde bei CGH2_2 das Oberflächenprofil in eine 385nm dicke fused silica-Schicht transferiert. Dazu waren zu der elektronenstrahlolithographischen Belichtung noch zwei weitere Ätzschritte notwendig. Um die Aluminium-Reflexionsschicht vor einem Ätzangriff zu schützen wurde eine zusätzliche Aluminiumoxid-Schutzschicht von 20nm Dicke aufgebracht (Abb.18 rechts). Um die Strukturtreue der nur wenige hundert Nanometer breiten Strukturen gewährleisten zu können, waren ausführliche Ätztests erforderlich. Die Belichtungszeit für eine Fläche von 5,8cm x 5,8cm betrug 22h und ist damit etwas geringer als beim lokalen Gitter Ansatz.

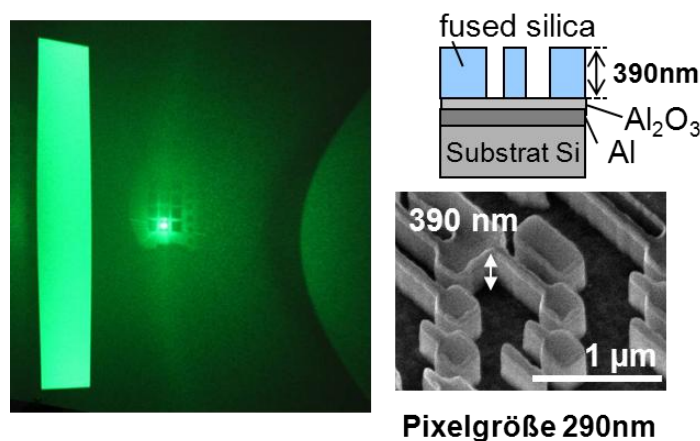


Abb. 18: Optische Rückstreuungsfunktion von CGH2_2 bei einer Beleuchtungslaserwellenlänge von 532nm (links) und Zusammensetzung und Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Elementes (rechts).

Das Ergebnis der optischen Rückstreuungsfunktion von CGH2_2 ist äußerst positiv zu bewerten (Abb.18, links). Die unerwünschte Spiegelordnung ist gut unterdrückt, die Eyeboxverteilung sehr homogen und die 0. Ordnung beträgt 10% des einfallenden Lichtes. Die Gesamteffizienz und Stabilität konnte durch die Verwendung von fused silica statt ausgehärtetem Resist verbessert werden, allerdings rechtfertigt der Aufwand kaum diesen Nutzen, weshalb bei folgenden Element auf das Materialsystem Resist auf Aluminium zurückgegriffen wurde. Bei dieser Konfiguration ist nur ein Belichtungsschritt mittels Elektronenstrahlolithographieanlage und eine anschließende Entwicklung und Aushärtung des Resists notwendig.

1.5.5.3. Vergleich der Ansätze

Beide Designansätze besitzen unterschiedliche Vor- und Nachteile, weswegen sie im Rahmen des Projektes parallel verfolgt wurden. Der lokale Gitter Ansatz hat große Vorteile im Hinblick auf die Rechenzeit sowohl im Design als auch bei der

Konvertierung der Daten für die Elektronenstrahlolithographieanlage. Dieser Punkt gestaltet sich beim globalen Ansatz als wesentlich aufwendiger.

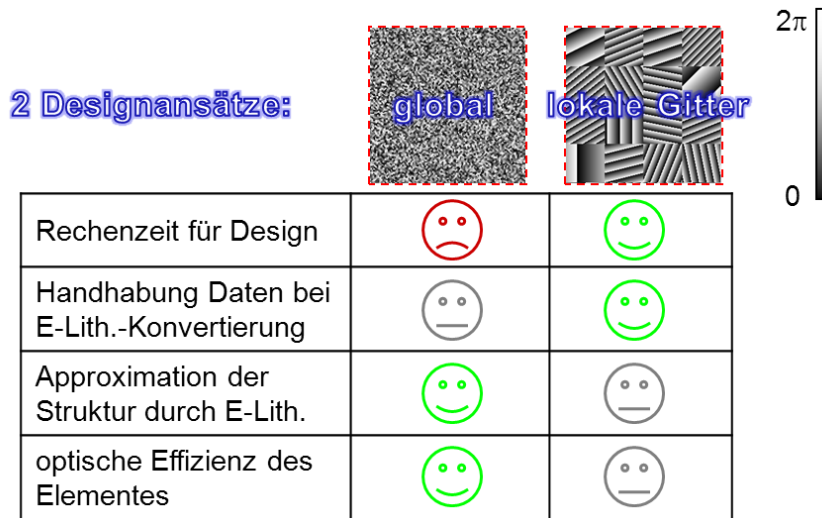


Abb. 19: Kurzer Überblick über die Vor- und Nachteile des globalen und lokalen Gitter Ansatzes.

Die Approximation der Phasenfunktion mittels der verfügbaren E.-Lith Shapes (machbare Geometrien der Elektronenstrahlolithographieanlage) ist jedoch beim globalen Ansatz wesentlich besser, da es sich hierbei um einen pixelierten Ansatz handelt. Die unterschiedlichen Winkelorientierungen der Subzellen beim lokalen Gitter Ansatz erschwert eine günstige und in Betracht auf die Schreibzeit mögliche Approximation. Das in Kapitel 1.3.2. beschriebene Vorgehen führt hierbei, die Strukturtreue betreffend, zu keiner optimalen Lösung. Die optische Effizienz ist daher für den globalen Ansatz als besser zu beurteilen. Die besonders auffälligen Strörordnungen beim lokalen Gitter Ansatz sind jedoch kein Artefakt der E.-Lith. Approximation, sondern stammen vielmehr aus der regelmäßigen Anordnung der Subzellen, die schon durch das Design bedingt werden.

Eine endgültige Auswahl des günstigeren Ansatzes kann jedoch erst durch die Beurteilung einer skalierten Schirmfläche unter Beleuchtung mittels eines Projektors in Punkt auf Homogenität und Effizienz erfolgen.

1.6. AP5: Herstellung von Testhologrammen mit ortsabhängigen Eyeboxen auf Basis verschiedener Herstellungsstrategien

1.6.1. Konfiguration des finalen Elementes

Im Design von CGH3 sollen die unterschiedlichen Einfallswinkel des Projektors in Richtung Schirmrand berücksichtigt werden. Die horizontalen Einfallswinkel variieren dabei von -16° bis $+16^\circ$ und die vertikalen Einfallswinkel von 16° bis 33° in Bezug auf den Schirmmittelpunkt. Da die Position der Eyebox bei den unterschiedlichen Einfallswinkeln konstant gehalten werden soll, ist eine entsprechende Verkippung, die den veränderten Einfallswinkel ausgleicht, notwendig. Da ein kontinuierliches „Nachkippen“ schwer zu realisieren ist, wurde eine Winkeldiskretisierung in 16×9 Streuzellen eingeführt. Das lokale und globale Design der finalen Elemente wurde von LightTrans durchgeführt.

6" Wafer mit 16x9 Streuzellen

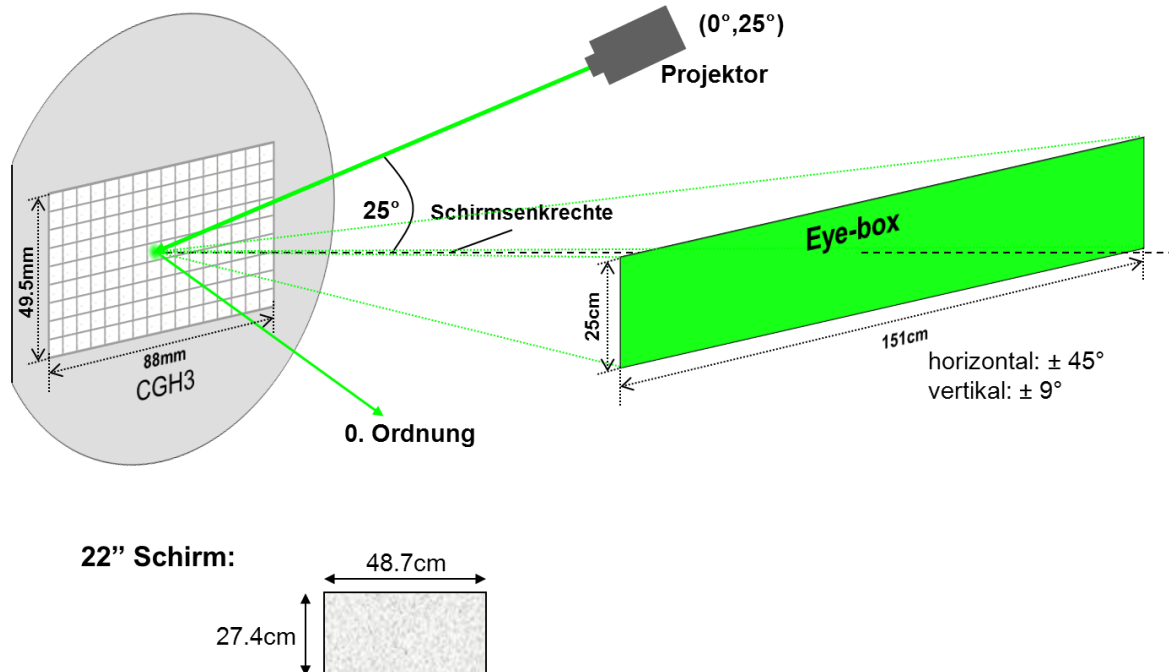


Abb. 20: Optische Konfiguration bezüglich des mit der Rückstreuungsfunktion ausgestatteten 6" Wafers.

Die 16x9 Streuzellen mit einem Ausmaß von 88mm x 49,5mm enthalten dann die optische Funktion des 22"-Schirmes, welche dann mittels Kontaktkopierverfahren skaliert werden sollte (Abb.20).

1.6.2. Vortest zur Verkippung mit Vorverzerrung (CGH3_0)

Zum Test des „Nachkippen“ der Eyebox unter Berücksichtigung einer korrekten Vorverzerrung wurde von der FSUJ ein Testelement CGH3_0 unter Verwendung des globalen Ansatzes designt und hergestellt.

Die Vorverzerrung muss hierbei auf die jeweilige Position bezüglich des Schirmes angepasst werden. Zum Test wurden 3x3 verschiedene Schirmpositionen ausgewählt (Abb.21). Der Rechenaufwand steigt dabei mit zunehmender Auflösung der Eyeboxen rasch an.

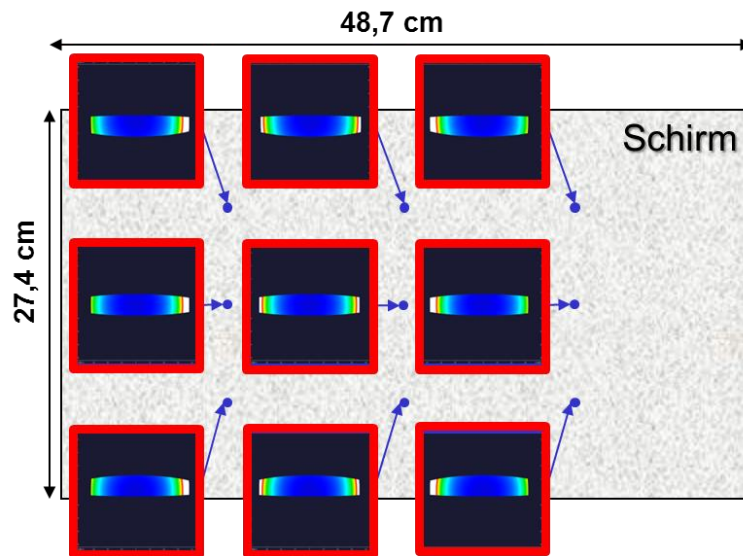


Abb. 21: Für unterschiedliche Schirmpositionen muss eine angepasste Vorverzerrung durchgeführt werden.

Als Materialsystem wurde wieder eine 300nm dicke Resistschicht auf Aluminium verwendet. Als Pixelgröße wurden 295nm gewählt.

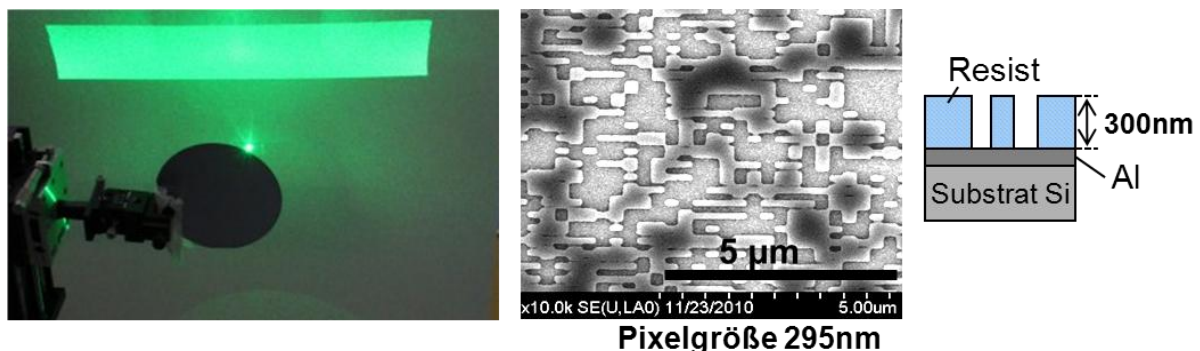


Abb. 22: Optische Rückstreuungsfunktion von CGH3_0 bei einer Beleuchtungslaserwellenlänge von 532nm (links) und Zusammensetzung und Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Elementes (rechts).

Die optischen Rückstreuungsfunktionen der Eyeboxen sind sehr homogen und korrekt vorverzerrt (Abb.22). Der Vortest ist also als äußerst positiv einzuschätzen.

1.6.3. Finales Element CGH3_1 (lokale-Gitter Design)

Wie unter 1.6.1. dargelegt, handelt es sich bei dem finalen Element um einen verkleinerten Schirm des endgültigen 22“ Schirmes. Bei der Konvertierung der Phasenfunktion in elektronenstrahlolithographisch schreibbare Daten, wurde die Approximation, die in Kapitel 1.3.2. beschrieben ist, verwendet. Als Materialsystem wurde wieder ausgehärteter Resist auf Aluminium verwendet. Die Gitterperiode des Subwellenlängengitters betrug, wie bei CGH2_1, 300nm. Die Schreibzeit des Elementes betrug ca. 27h.

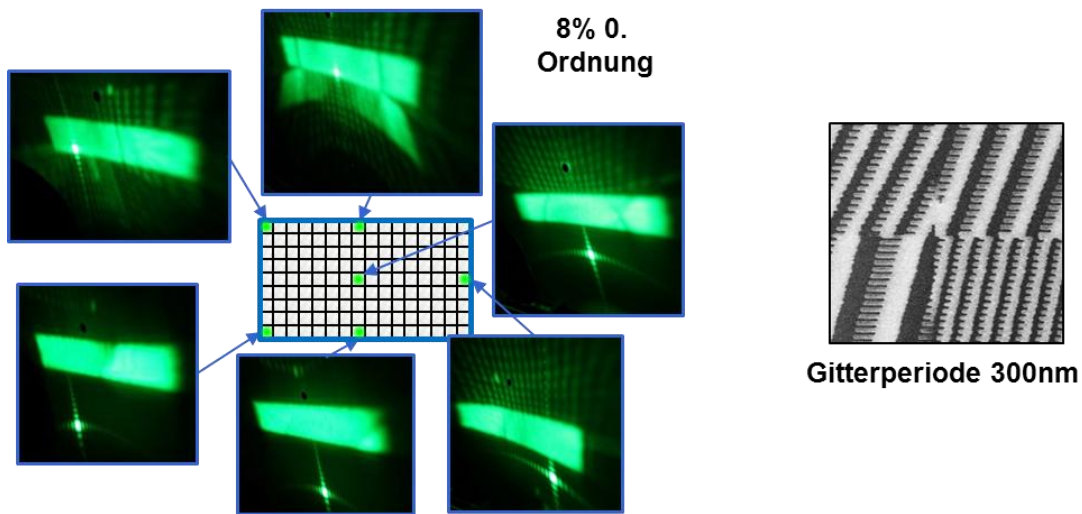


Abb. 23: Optische Rückstreuungsfunktion von CGH3_1 bei einer Beleuchtungslaserwellenlänge von 532nm für verschiedene Schirmpositionen (links) und Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Elementes (rechts).

Die optische Rückstreuungsfunktion bei einer Wellenlänge von 532nm ist recht homogen und die 0. Ordnung beträgt ca. 8% des einfallenden Lichtes. Die unerwünschte Spiegelordnung ist gut unterdrückt. Trotzdem sind, wie bei CGH2_1, unerwünschte Gittereffekte zu erkennen, die zum Teil auf die regelmäßige Anordnung der Subzellen zurückzuführen sind (Abb.23).

1.6.4. Finales Element CGH3_2 (globales Design)

Das globale Element basiert auf demselben Materialsystem wie das lokale Element (300nm Resist auf Aluminium).

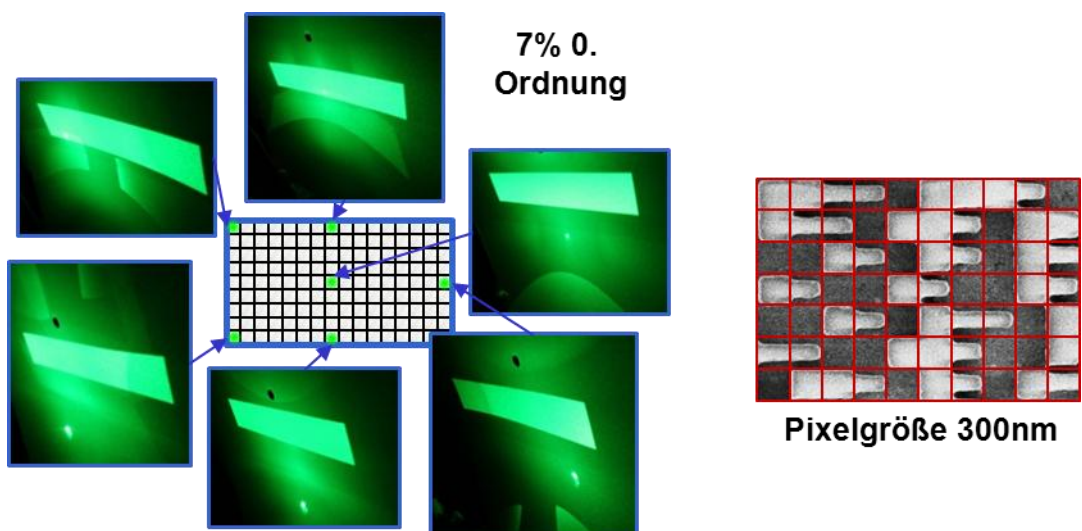


Abb. 24: Optische Rückstreuungsfunktion von CGH3_2 bei einer Beleuchtungslaserwellenlänge von 532nm für verschiedene Schirmpositionen (links) und Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Elementes (rechts).

Die Schreibzeit des Elementes betrug ebenfalls 27h. Die Schreibzeitersparnis, die noch bei der Belichtung von CGH2 zwischen globalen und lokalen Ansatz deutlich war, ist hier durch die stark hochfrequenten Phasenfunktionen, die vor allem im

rechten und linken Randbereich des Schirmes auftreten wieder wett gemacht. In diesem Fall ist kaum noch eine Zusammenfassung benachbarter Pixel zu einem E.-Lith. Shape möglich und die Anzahl der notwendigen Belichtungsshots, und somit auch die Belichtungszeit, steigt.

Die optische Verteilung (Abb.24) sieht sehr homogen aus, die Spiegelordnung konnte sichtbar unterdrückt werden und die 0. Ordnung konnte auf 7% des einfallenden Lichtes reduziert werden.

Beide Masterhologramme CGH3_1/2 zeigen also gute Voraussetzungen für die geplante Skalierung mittels des holographischen Kontaktkopierverfahrens. Die endgültige Auswahl des am besten geeigneten Designansatzes (lokale Gitter oder global) muss durch eine genaue Untersuchung (Homogenität, Effizienz, Rückstreuverhalten, ...) am skalierten Zielelement vorgenommen werden.

1.7. Ausblick

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten werden im Wesentlichen durch den Kostenaufwand zur Herstellung der Masterhologramme bestimmt. Diese Kosten skalieren dabei mit der notwendigen Schreibzeit der Elektronenstrahlolithographieanlage. Zur Reduzierung der Schreibzeit wird von der Herstellerfirma der an der FSUJ genutzten Elektronenstrahlolithographieanlage ein neuer innovativer Weg verfolgt. Ersten Abschätzungen zu Folge kann hierbei für die hier gezeigten notwendigen Strukturen die Belichtungszeit um einen Faktor 50 reduziert werden. Die hier demonstrierten Elemente mit einer Belichtungsdauer von ca. 30h würden unter Verwendung des neuen Prinzips nur noch eine halbe Stunde belichten. Dies wäre ein kostengünstiger Ansatz zur Herstellung solcher effektiven Medien CGHs.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Position Gesamtfinanzierungsplan	Gesamtfinanzierungsplan	Abgerechnete Ausgaben
0812 Personal Wiss.	131,700.00	132,852.81
0817 Personal Techn.	85,500.00	103,475.59
0822 sonstige Beschäftigte	11,900.00	8,837.68
0831 Gegenstände <410€	1,500.00	583.45
0835 Unteraufträge	12,000.00	12,103.00
0838 Verbrauchsmaterial	42,000.00	34,376.48
0844 Dienstreisen Inl.	6,500.00	2,949.60
0845 Dienstreise Ausl.	6,000.00	3,117.04
0850 Investitionen >410€	16,000.00	14,803.60
Summe	313,100.00	313,099.25

Die Fördermittel wurden im Bearbeitungszeitraum inklusive der kostenneutralen 6 monatigen Verlängerung entsprechend der Antragsstellung verausgabt. Die Mittel werden im zahlenmäßigen Nachweis detailliert dargestellt.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bei der Bearbeitung des Teilprojektes wurde sich an den beantragten Arbeitsplan gehalten. Die geforderten Masterhologramme konnten erfolgreich von der FSUJ hergestellt werden. Zusätzlich wurden sogar, über diesen Arbeitsplan hinaus, Aufgaben im Design und der Modellierung übernommen. Insofern kann von der Angemessenheit der Arbeiten ausgegangen werden.

4. Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Die wissenschaftlich-technischen Erfolgsaussichten sind sehr gut zu bewerten. Es konnte ein neuer effektiver Medien Ansatz für stark divergente diffraktive Strahlformung erfolgreich demonstriert werden und einige hochwertige Veröffentlichungen publiziert werden. Viele technologische Aspekte zur Erzeugung der Strukturgrößen von nur wenigen hundert Nanometern konnten im Rahmen des Projektes gelöst werden. Die hier gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse werden die FSUJ befähigen weitere Projekte in diesem Themengebiet zu beantragen und erfolgreich zu bearbeiten. Insbesondere ist, ausgelöst durch das Alleinstellungsmerkmal der Elektronenstrahlolithographieanlage, mit weiteren Aufträgen in diesem Bereich zu rechnen.

5. Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Zu unserem Kenntnisstand wurde zu diesem Projekt erstmalig ein effektiver Medien Ansatz für komplexe hochdivergente diffraktive Strahlformung genutzt. Auch die Verwendung der holographischen Kontaktkopie ist ein neuartiges Verfahren zum Kopieren und Skalieren der generierten Masterhologramme. Beide Verfahren haben ein großes Potential im Bereich optischer Anwendungen. Den Projektergebnissen ähnliche Ergebnisse anderer Stellen sind nicht bekannt.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

W. Freese, T. Kämpfe, E.-B. Kley, und A. Tünnermann, Proc. SPIE 7591, 75910Z, 75910Z-7 (2010).

W. Freese, T. Kämpfe, E.-B. Kley, und A. Tünnermann, Opt. Lett. 35(5), 676–678 (2010).

W. Freese, T. Kämpfe, E.-B. Kley, und A. Tünnermann, Proc. SPIE 7927, 792710, 792710-7 (2011).

W. Freese, T. Kämpfe, W. Rockstroh, E.-B. Kley, und A. Tünnermann, Opt. Exp. 19(9), 8684–8692 (2011).