

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis – Teil I

**zum Forschungsvorhaben:** „Vorentwicklung eines optischen vertikalen Koppelmechanismus zur passiven, automatisierbaren Aufbau- und Verbindungstechnik von photonischen Bauteilen“ (GISC)

**Zuwendungsempfänger:** Fraunhofer Institut für Mikrointegration und Zuverlässigkeit

**Förderkennzeichen des Teilvorhabens:** 13N15909

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.09.2021 – 29.02.2024

## Teil I:

Das wissenschaftliche Vorprojekt „GISC“ (Gradient-Index-Surface-Coupling) umfasste die Vorentwicklung eines neuartigen Koppelkonzepts. Dieses soll eine effiziente optischen Verbindung von in Glas integrierten Lichtwellenleitern mit Fasern und integrierten Lichtwellenleitern anderer Materialien wie Polymeren, Silizium und Siliziumnitrid ermöglichen. In Glas integrierte Lichtwellenleiter bieten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen Datacom, Sensorik und Quantum-Packaging. In der Datacom sind sogenannte „Glass Core Substrates“ und das „Co-Packaging“ zukunftsweisende Technologiebereiche. Wie bei vielen Technologien der integrierten Optik, wie beispielsweise andere glasbasierte Ansätze, die Nutzung von Polymeren, sowie Silizium oder Siliziumnitrid als Materialien, stellen die Koppelstellen zu Fasern oder anderen integrierten Lichtwellenleitern ein wichtiges Forschungs- und Entwicklungsthema dar.

Das neuartige hier verwendete Koppelkonzept wurde in einer Veröffentlichung<sup>1</sup> konzeptionell gezeigt und in diesem Projekt untersucht. Es handelt sich dabei um ein innovatives Koppelkonzept, welches die Tatsache nutzt, dass bei der Integration von Lichtwellenleitern in Glas mittels eines Ionenaustauschprozesses halbe Gradientenindexlinsen (GRIN-Linsen) in das Glas integriert werden können. Dies wird durch das gezielte Abdecken von Bereichen des Glases im Prozess, bei dem die Lichtwellenleiter vergraben werden, erreicht. So entstehen an Lichtwellenleiter angeschlossene GRIN-Linsen mit maximalem Brechzahlhub an der Oberfläche des Glases. Der Übergang zwischen Lichtwellenleiter und der integrierten GRIN-Linse wird im Folgenden als GISC-Struktur bezeichnet. Das Koppelprinzip besteht darin, das optische Signal aus dieser Struktur auskoppeln zu können, indem das optische Signal im Glas aufgeweitet wird, aus der Oberfläche auskoppelt und in einem Koppelpartner spiegelsymmetrisch wieder fokussiert wird und im Fokuspunkt in eine Faser oder einen Chip einkoppelt. Für diesen Koppelpartner wurden in diesem Projekt ein zweites Glas mit ebendiesem

---

<sup>1</sup> J. Schwietering et al., "Integrated optical single-mode waveguide structures in thin glass for flip-chip PIC assembly and fiber coupling," 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, USA, 2020, pp. 148-155, doi: 10.1109/ECTC32862.2020.00036.

Brechzahlprofil genutzt, aber auch halbe kommerziell verfügbare GRIN-Linsen. Siliziumgitter als Koppelpartner der GISC-Struktur wurden simuliert.

Das Koppelprinzip führt dazu, dass beim Auskoppeln aus der Glasoberfläche der optische Strahl maximal aufgeweitet ist. Auf diese Weise ist genau in diesem Bereich die Justage maximal tolerant. Zudem ist prinzipbedingt eine große 1dB Bandbreite möglich, außerdem kann die Auskopplung überall auf dem Glasboard erfolgen und ist nicht auf die Glaskanten beschränkt.

Im Projekt konnten diese Eigenschaften erfolgreich demonstriert werden. Die Zielparame-ter, eine Justagetoleranz größer  $\pm 5 \mu\text{m}$  und eine spektrale 1dB-Bandbreite von  $>100\text{nm}$ , wurden erfolgreich gezeigt. Nicht erreicht wurde das ambitionierte Ziel einer Koppelleffizienz von unter 0,5 dB. Erzielt werden konnten 2,7 dB mit einer Standardabweichung von 0,1 dB. Ein Wert von unter 3 dB ist jedoch für einige Anwendungen, bei denen das Powerbudget weniger wichtig ist, als beispielsweise eine hohe Justagetoleranz, interessant.

Erreicht wurden diese Ergebnisse mithilfe umfangreicher Simulationen aller Koppelkonzepte, aus denen die Parameter und Designs bei den experimentellen Versuchen hervorgingen. Für diese Experimente wurden mehrere Prozessruns durchlaufen, sodass eine Vielzahl unterschiedlicher GISC-Strukturen erzeugt wurde. Diese wurden mithilfe zweier eigens konzipierter Messaufbauten und bestehender Messtechnik umfangreich untersucht. Die konzipierten Messaufbauten nutzen unter anderem Prismen, die auf den GISC-Strukturen platziert, ein Auskoppeln des Lichts bewirkten, welches im Fernfeld, mit Messaufnahmen entlang der Lichtausbreitung, untersucht werden konnte. Zudem wurden zwei Gläser mit jeweils identischen GISC-Strukturen aufeinander platziert und ein erfolgreiches Überkoppeln detektiert. Auch die Kopplung mittels halber GRIN-Linsen wurde erfolgreich gezeigt. Dafür wurde ein Prozess entwickelt, um diese wenige mm großen Linsen auf den halben Durchmesser polieren zu können. Sowohl bei der Kopplung zweier GISC-Strukturen, als auch der Kopplung mittels der GRIN-Linse, wurden die Justagetoleranzen, sowie die Bandbreite untersucht.

Die erzielten Ergebnisse sind sehr vielversprechend und stellen eine hervorragende Grundlage dar, um in zukünftigen Forschungsprodukten darauf aufzubauen. Die Projektergebnisse zeigen, dass das Koppelprinzip geeignet ist, um dies für einen optischen Stecker zu nutzen. Dieser Stecker und auch die Variante eines Linsenarrays in einem Stecker zum Anschluss von Faserarrays an mehreren Lichtwellenleiter in Glas, soll in zukünftigen Arbeiten entwickelt werden.

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis – Teil II

**zum Forschungsvorhaben:** „Vorentwicklung eines optischen vertikalen Koppelmechanismus zur passiven, automatisierbaren Aufbau- und Verbindungstechnik von photonischen Bauteilen“ (GISC)

**Zuwendungsempfänger:** Fraunhofer Institut für Mikrointegration und Zuverlässigkeit

**Förderkennzeichen des Teilvorhabens:** 13N15909

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.09.2021 – 29.02.2024

## Teil II:

### Arbeitspaket 1: Festlegung von Anforderungen & Spezifikationen

Antragsgemäß wurden im ersten Arbeitspaket die Anforderungen und Spezifikationen festgelegt. Dafür wurde die zur Erstellung des Projektantrages begonnene Literaturrecherche fortgesetzt. Es wurde festgestellt, dass in der Zwischenzeit, zwischen der Antragsphase und dem Projektbeginn, einiges an relevanter Literatur hinzugekommen ist. Obwohl das Thema aktuell große Forschungsaktivität zeigt, wurde jedoch keine aus unserer Sicht weiterführende Lösung präsentiert, sodass wir nach wie vor einen großen Bedarf für den hier vorgeschlagenen GISC-Ansatz für eine tolerante optische Koppelmöglichkeit mit hoher Effizienz sehen. Die vielversprechendsten Ergebnisse wurden von Corning<sup>1</sup> gezeigt, jedoch konventionell mit Stirnflächenkopplung zwischen Faser und Wellenleiter, die sich nur auf die Ränder beschränkt, und an die evaneszente Kopplung zu Si-Chips sind weiterhin hohe Justageanforderungen gestellt. Der Literatur konnten jedoch gut die Anforderungen der Industrie an Steckerlösungen entnommen werden.

Auch weitere Literatur, die nach der Projektlaufzeit veröffentlicht wurde, konnte keine zufriedenstellenden Koppelkonzepte präsentieren.<sup>2</sup> Auch daher reißt die Entwicklung neuartiger Konzepte nicht ab<sup>3</sup> und wir sind überzeugt, hier wesentliche Fortschritte erarbeitet zu haben und nun in Konsortialprojekten die Arbeiten fortsetzen zu können.

---

<sup>1</sup> Brusberg, Lars; Grenier, Jason R.; Zakharian, Aramais R.; Yeary, Lucas W.; Seok, Seong-Ho; Noh, Jung-hyun et al. (2023): Glass Platform for Co-Packaged Optics. In: IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., S. 1–11. DOI: 10.1109/JSTQE.2023.3247245.

<sup>2</sup> Boucaud, Jean-Marc; Durand, Cédric; Giancesello, Frédéric; Bucci, Davide; Broquin, Jean-Emmanuel; Dubois, Emmanuel (2024): Glass interposer for heterogeneous integration of flip-chipped photonic and electronic integrated circuits. In: Applied Physics Letters 125 (5), Artikel 054101. DOI: 10.1063/5.0221309.

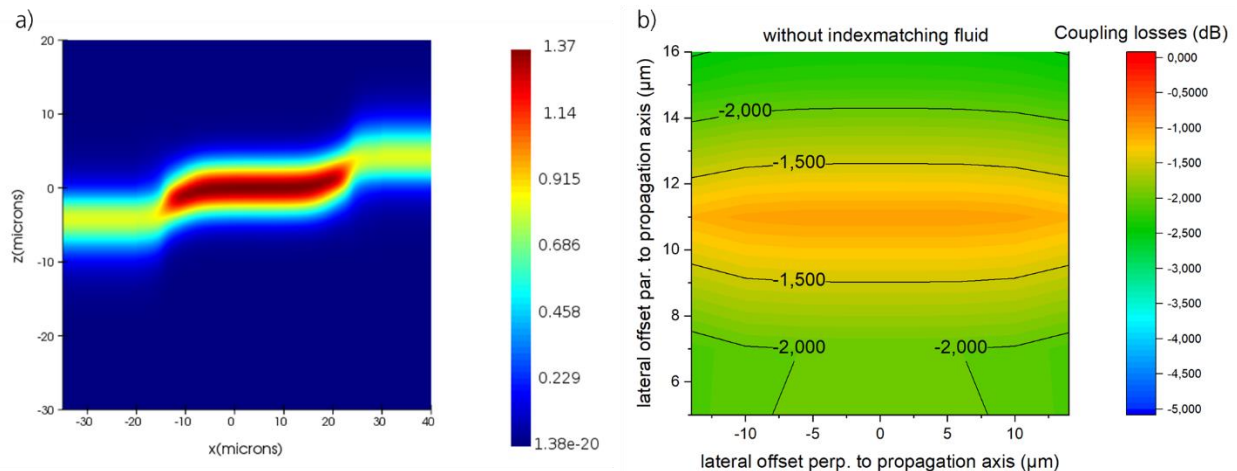
<sup>3</sup> Le Phu, Thien; Le Coq, David; Masselin, Pascal (2025): Waveguide fabrication with integrated coupling optic. In: Optics & Laser Technology 180, S. 111522. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111522.

Fazit: AP1 wurde erfolgreich abgeschlossen.

## Arbeitspaket 2: Design und Simulation

Bei der Simulation der GISC-Bereiche zeigte sich, dass die in den Wellenleitersimulationen vorher vereinfacht vorgenommene Berechnung der Dispersion zu nicht vernachlässigbaren Fehlern führt. Die Brechzahlprofile können messgerätbedingt nicht mit der Zielwellenlänge (1550 nm) gemessen werden. Daher war eine Umrechnung der Brechzahlprofile auf eine andere Wellenlänge notwendig. Da es dazu jedoch keine analytische Lösung gibt, wurde experimentell der wellenlängenabhängige Brechzahlhub untersucht und in das Simulationsmodell integriert.

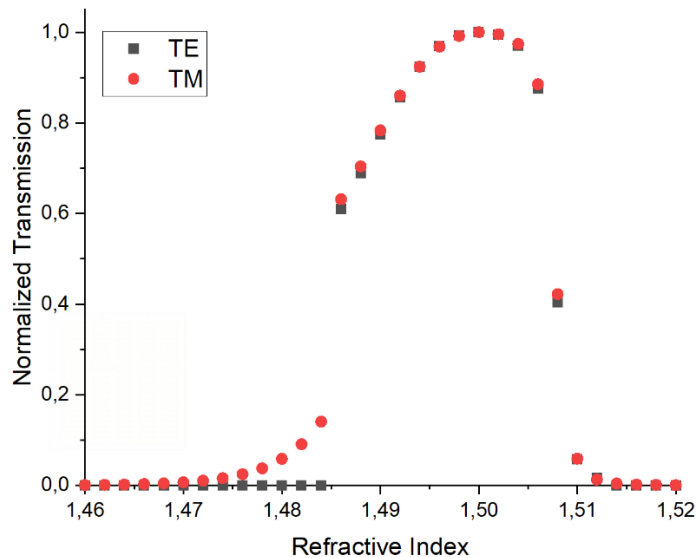
Im AP2 wurde eine Vielzahl an Simulationen durchgeführt, aus denen sich die für die Experimente benötigten Brechzahlprofile erfolgreich ermitteln ließen, wie beispielhaft in Abbildung 1a dargestellt. Zudem wurde der Einfluss der Fehljustage erfolgreich simuliert. Dies wird beispielhaft in Abbildung 1b gezeigt.



**Abbildung 1:** a) 2D E-feld Monitor entlang der Ausbreitungsrichtung bei  $y = 0$  (also dort, wo das Wellenleitermaximum liegt), b) Einfluss der Fehljustage bei festgelegtem Abstand der GISC Strukturen zueinander auf die Koppeldämpfung.

Als besonders entscheidend für die experimentellen Untersuchungen stellte sich jedoch die Simulation der Koppeldämpfung (hier Transmission) in Abhängigkeit vom Brechungsindex der Indexmatchingschicht zwischen zwei GISC Profilen heraus. Diese ist für ein Parameterset und eine  $5 \mu\text{m}$  dicke Indexmatchingschicht in Abbildung 2 dargestellt. Die Simulation zeigte hier die Notwendigkeit auf, den Brechungsindex für das entsprechende Parameterset (insbesondere Profilparameter der GISC-Strukturen) gezielt auszuwählen. Dabei ist der Bereich der maximalen Transmission händelbar breit, sodass für die technologische Umsetzung passende Indexmatchingöle, bzw. geeignete Kleber verfügbar sind. Diese Simulationen wurde erstellt, nachdem im Experiment keine Kopplung zwischen zwei GISC-Profilen gelang und war damit, wie sich nach dem

Berichtszeitraum herausstellte (Nachtrag der Meilensteinpräsentation), ein wesentlicher Baustein zur späteren erfolgreichen Kopplung. Je nach GISC Profil ändert sich der optimale Bereich, daher ist die Abbildung 2 exemplarisch zu verstehen.



**Abbildung 2:** Abhängigkeit der Koppeldämpfung (hier Transmission) vom Brechungsindex der Indexmatchingschicht.

*Fazit: AP2 konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die Simulation wurden genutzt, um ideale GISC-Profile zu ermitteln, sodass viele Experimente optimiert werden konnten. Zudem wurde die die Notwendigkeit eines im Brechungsindex an die Profile angepassten Indexmatchingöls ermittelt, sodass dies in den Experimenten berücksichtigt werden konnte. Der Anteil der Simulationsarbeiten am Gesamtaufwand war letztlich deutlich größer als geplant, jedoch wesentlich und notwendig, um die Ergebnisse der Experimente zu verstehen.*

### Arbeitspaket 3: Strahlanalyse der Auskopplung

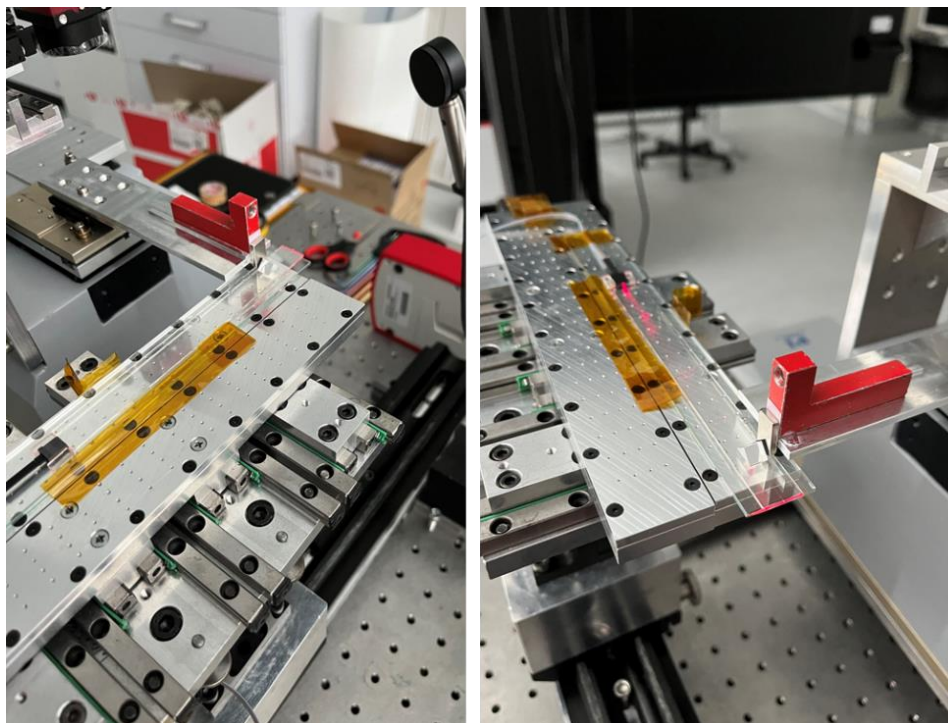
In diesem AP wurde die Strahlauskopplung aus der GISC-Struktur untersucht. Dabei wurden antragsgemäß drei Messmethoden verwendet. 1) die Verwendung einer IR-Kameras, die senkrecht auf die GISC Struktur ausgerichtet wird. 2) die Verwendung eines Koppelprismas und ein großflächiger Detektor. 3) Scanning-Near-Field-Optical-Mikroskopy (SNOM).

Im Laufe des Projektes zeigte sich, dass eine Kombination von 1) und 2) die erfolgreichste Methode war, die GISC Strukturen zu charakterisieren. Es wurden jedoch auch SNOM-Messungen durchgeführt: Dafür wurden Proben mit Wellenleitern und GISC Strukturen mit Fasersteckern versehen, sodass diese in SNOM-Geräte eingesetzt werden konnten und mit an die Fasern angeschlossenen Lasern in Funktion gebracht werden konnten. In Abbildung 3 ist eine solche Probe gezeigt.



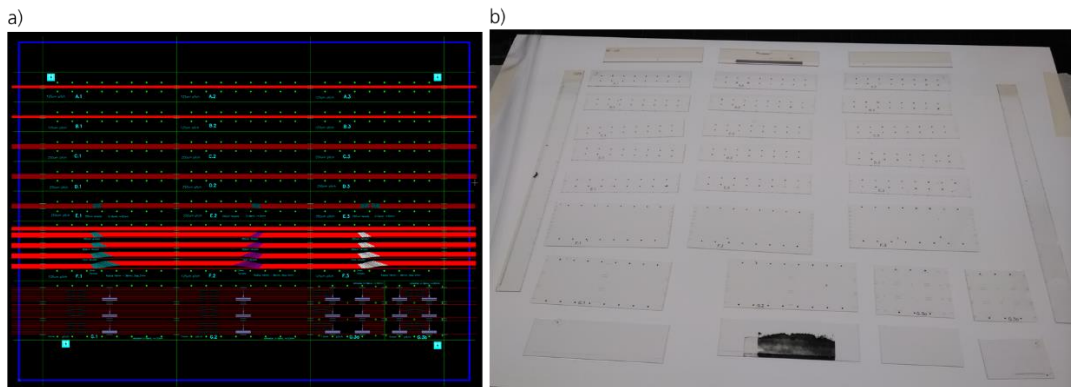
**Abbildung 3:** Oben: Foto einer besteckerten Glasprobe mit Wellenleitern und GISC Strukturen. Unten: Layoutausschnitt (180° gedreht und zwecks vollständiger Beschriftung größer als der tatsächliche Ausschnitt im Foto), mit den Lichtwellenleitern in rot und der Beschriftung, den Justagemarken und den Diffusionsmasken für die Ausdiffusion in türkis.

Für die Messmethode bei der ein Auskopplern mit einem Prisma erfolgt, wurde ein Messplatz aufgebaut, bei dem ein Koppelprisma mittels eines Hexapoden mit hoher Genauigkeit (sub- $\mu\text{m}$ ) justiert werden konnte. Der abgelenkte Lichtstrahl wurde mit einem großflächigen Powermeter aufgenommen. Dieses ist aus zwei Perspektiven in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Entwickelter und aufgebauter Messaufbau zur Untersuchung der Auskopplung aus einer GISC-Struktur mithilfe eines genau positionierbaren Prismas.

Es wurde eine Vielzahl an Proben hergestellt, die mit diesem Aufbau untersucht werden konnte. Das Layout und eines der beiden Testpanels sind in Abbildung 5 dargestellt.

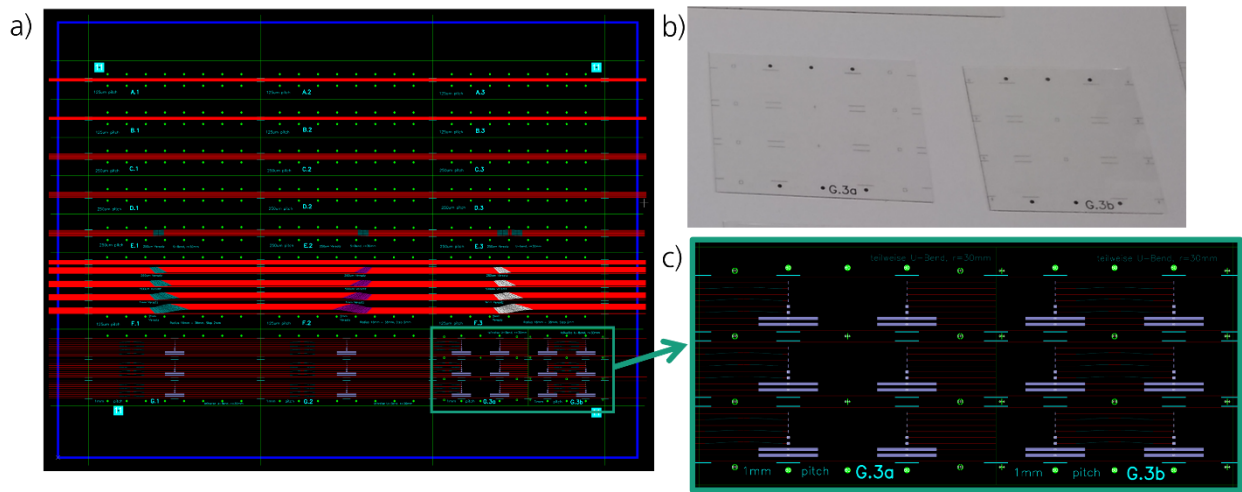


**Abbildung 5:** a) Layout für Testpanels mit verschiedenen GISC Strukturen. b) Foto eines solchen Panels nach der Endvereinzelung.

*Fazit: Im AP3 wurden verschiedene GISC Profile erfolgreich untersucht. Dafür wurden SNOM Untersuchungen durchgeführt und ein Aufbau aufgebaut, der es ermöglicht, die direkte Auskopplung aus der GISC Struktur mit Prismen zu untersuchen. So konnten die Simulationen erfolgreich verifiziert und verbessert werden.*

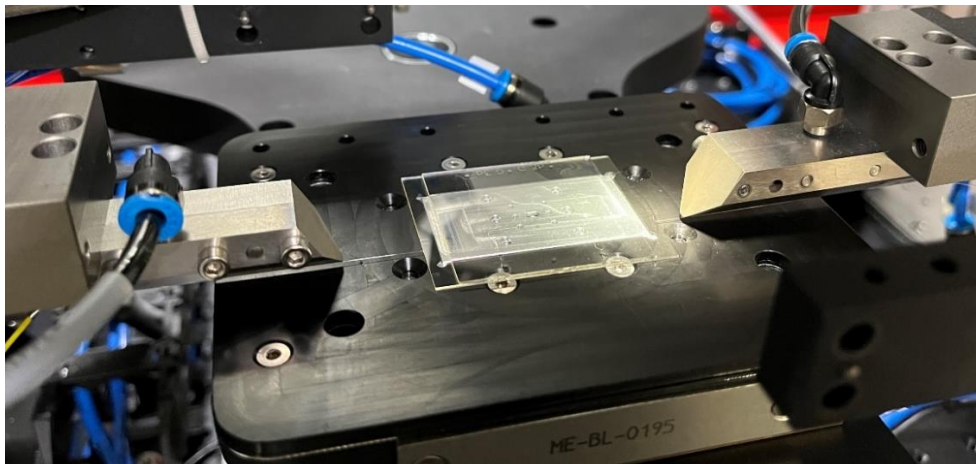
## **Arbeitspaket 4: Kopplung spiegelsymmetrischer Strukturen**

Das Ziel von AP4 war es, die Kopplung mittels zweier identischer GISC-Strukturen (spiegelsymmetrischer Aufbau) unter Beweis zu stellen. Dabei sollten meilensteinrelevante Parameter (Koppelverlust, spektrale Bandbreite und Justagetoleranzen) erreicht werden. Dafür wurde ein Layout mit verschiedenen Teststrukturen und unterschiedlichen GISC-Profilen erstellt. Insbesondere enthielt das Layout, von dem zwei Panels gefertigt wurden, die Sub-Panels G.3a und G.3b (vgl. Abbildung 6), mit denen eine zweifache GISC-Kopplung experimentell unter Beweis gestellt werden sollte. G.3a enthält Wellenleiter, die eine Unterbrechung besitzen. An beiden Seiten dieser Wellenleiterunterbrechung befinden sich GISC Bereiche. G.3b enthält Wellenleiter, welche die Länge der Unterbrechung in G.3a besitzen. Ebenfalls befinden sich dort an beiden Enden GISC-Strukturen. Die exakte Positionierung beider Sub-Panels zueinander stellt somit eine Brücke dar, die an beiden Enden eine GISC-Kopplung besitzt.



**Abbildung 6** a) Layout der Panels mit verschiedenen Teststrukturen und unterschiedlichen GISC-Strukturen, b) Foto von hergestellten Glaschips, die aus dem in c) vergrößerten Bereich stammen, c) Vergrößerter Bereich des Layouts zur Erzeugung zweier Glaschips, die mithilfe eines Brückendesigns eine zweifache GISC-Kopplung experimentell unter Beweis stellen sollen.

Diese Glaschips wurden, wie in Abbildung 7 dargestellt, mit einem FinePlacer justiert und verklebt. Im Anschluss wurde die Dämpfung gemessen. Dabei konnte in den ersten Versuchen keine erfolgreiche Kopplung erreicht werden. Ein möglicher Grund für die erfolglose Kopplung (Brechungsindex des Klebers) wurde bereits in AP3 beschrieben und dort im Anschluss simuliert. Zudem wurde in weiteren Experimenten ein wesentlicher Effekt entdeckt, der zu einer neuen Innovation führte und die geschützt werden soll, der eine signifikante Rolle spielt und im ersten Layout noch nicht berücksichtigt wurde. In allen späteren Layout wurde dieser Effekt berücksichtigt.



**Abbildung 7** Zueinander justierte und verklebte Glaschips in der Anlage zur Ermittlung der Dämpfung.

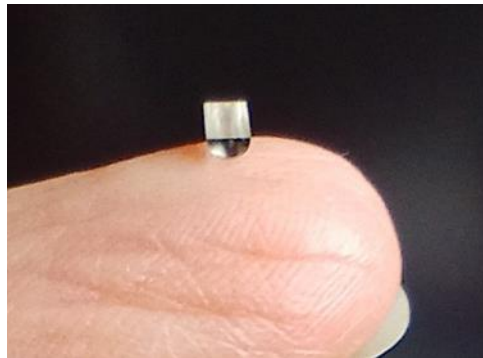
Nach dem Lösen beider Probleme wurde eine erfolgreiche Kopplung nicht in der „Brückenkopplung“, sondern in der Kopplung zweier spiegelsymmetrischen GISC Strukturen zueinander gezeigt werden. Dabei wurden die angestrebte spektrale 1dB-Bandbreite von größer 50nm erreicht, sowie die Justagetoleranzen von  $\pm 2 \mu\text{m}$  für eine zusätzliche Dämpfung von unter 1 dB.

*Fazit: In umfangreichen Versuchen wurde erfolgreich eine Kopplung, zwischen spiegelsymmetrischen GISC Strukturen in zwei Gläsern, gezeigt und damit ein wesentliches Projektziel erreicht.*

## **Arbeitspaket 5: Kopplung Glas – GRIN-Linse**

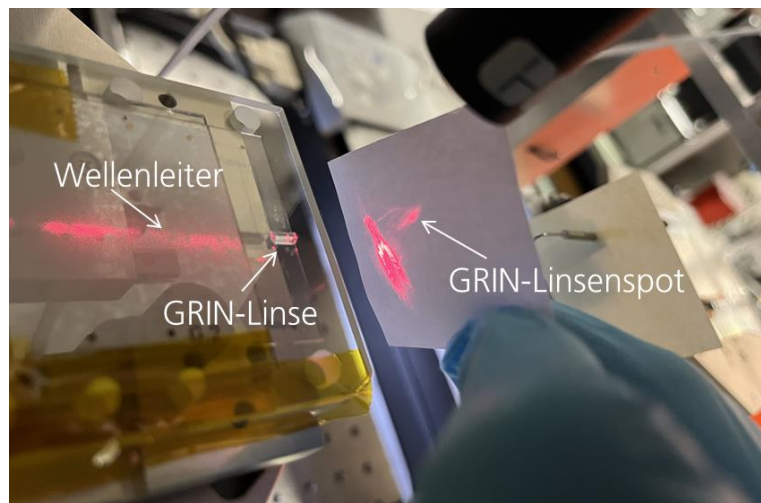
Im 5. Arbeitspaket sollte die Kopplung einer GISC Struktur zu einer halben Gradientenindexlinse (nicht in Glas integriert) untersucht werden.

Dafür wurden ein Prozess entwickelt, um Gradientenindexlinsen in ein Harz eingebettet polieren zu können und im Anschluss das Harz rückstandsfrei entfernen zu können. Dies wurde erfolgreich mit einer speziellen Beschichtung umgesetzt. Ein exemplarisches Ergebnis ist in **Abbildung 8** abgebildet.



**Abbildung 8:** Politurergebnis eine GRIN-Zylinderlinse.

Bereits ein händisches Auflegen auf die GISC-Struktur mit einer Pinzette ermöglicht, einen Teil des Lichts aus der GISC Struktur in die halbe Gradientenindexlinse einzukoppeln. Auch mit einer für ein Foto sichtbaren Wellenlänge, für die weder die GISC Struktur, noch die Linse optimiert sind, lässt sich dieser Effekt zeigen.

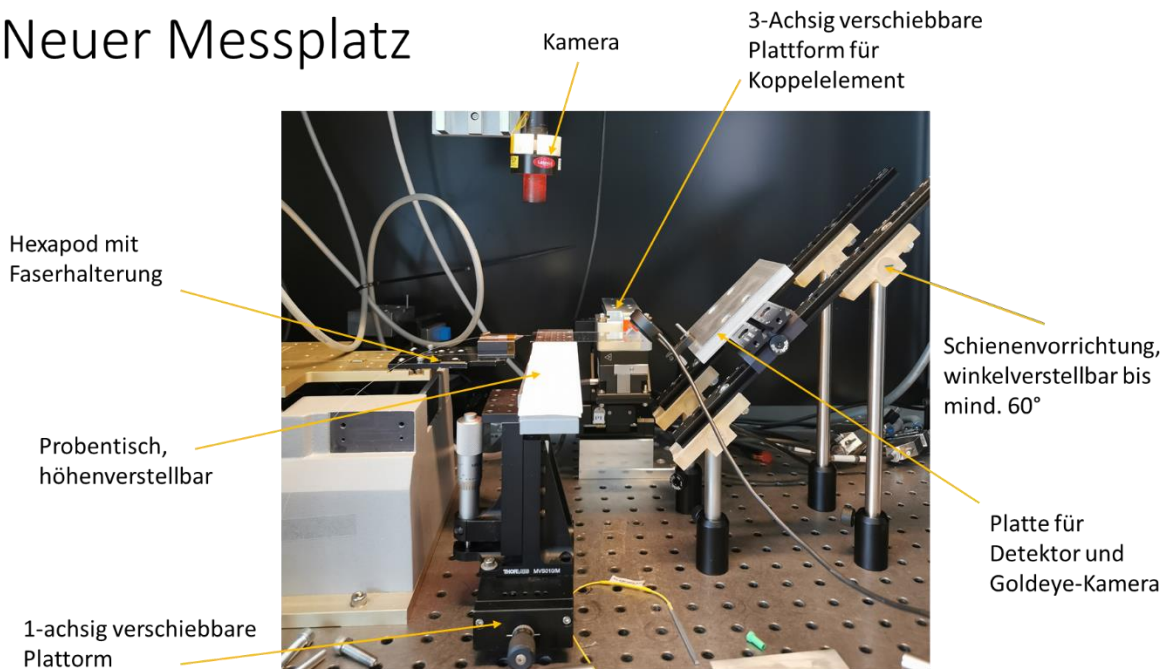


**Abbildung 9:** Erfolgreiches Auskoppeln aus der Glasebene mit einer händisch aufgelegten halben GRIN Linse.

Um die halben GRIN-Linsen gezielt platzieren zu können, wurde ein weiterer Messaufbau entwickelt. Dieser besteht aus einem Hexapoden mit Faserhalterung, sodass auch Glasproben verwendet werden

können, an die keine Faser angeklebt wurde. Die Glasprobe befindet sich auf einem höhenverstellbaren Probentisch und wird von oben mit einer Kamera gefilmt. Hinter der Glasprobe befindet sich eine 3-Achsig verschiebbare Plattform, an die die GRIN Linsen angeklebt werden können. An der Facette der Glasprobe befindet sich eine winkelverstellbare Schienenvorrichtung. Mit dieser lassen sich ein Detektor, aber auch insbesondere eine Kamera in Strahlrichtung stufenlos verschieben, auch wenn der Strahl in einem gewissen Winkel aus der Linse oder einem Prisma abgestrahlt wird.

## Neuer Messplatz



**Abbildung 10:** Seitenansicht eines für dieses Projekt entwickelten Messaufbaus zur Einkopplung einer Glasfaser in eine Glasprobe und dem genauen Platzieren eines Prismas oder einer halben GRIN-Linse auf der GISC Struktur. Zudem können ein Detektor oder eine Kamera in den Strahlengang der Facette der GRIN-Linse, der Glasfacette oder einem Prisma, positioniert werden und stufenlos in einem gewünschten Winkel verschoben werden.

Mit diesem Messplatz wurden Messungen mit den halben GRIN Linsen durchgeführt. Um die Strahlausbreitung aus der GISC Struktur noch besser verstehen zu können wurden, ähnlich zu AP3, zusätzliche Versuche durchgeführt, bei denen ein Prisma auf der GISC-Struktur platziert wurde. Mit der nun winkelverstellbaren Schienenvorrichtung ließ sich der aus der GISC-Struktur auskoppelnde und schließlich aus dem Prisma austretende Strahl mit einer speziell für die Strahlanalyse ausgelegten Kamera (Goldeneye) analysieren. Dabei konnten in definierten Abständen Aufnahmen gemacht werden, durch die der Strahl im Fernfeld charakterisiert werden konnte.

Dies waren weitere wichtige Messungen um die GISC Struktur besser verstehen und optimieren zu können.

Bei den Messungen mit halben GRIN-Linsen konnten Koppelverluste bestimmt werden, da sich in dieser Konfiguration die Referenz bestehend aus Messfaser in direkter Kopplung auf den Detektor

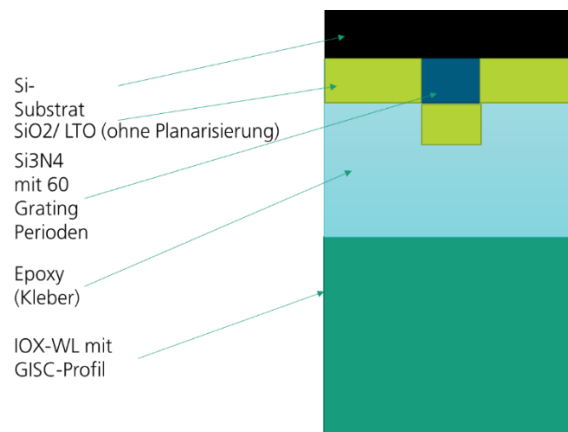
und die Messungen von Referenzwellenleitern derselben Probe umsetzen ließ. Die Referenz wurde genutzt um die Summe aus Koppelverlusten in den Wellenleiter, die Ausbreitungsverluste der Wellenleiter mit exakt der gleichen Länge wie die zu untersuchende Struktur bestehend aus Wellenleiter und GISC-Struktur, und die Koppelverluste aus den Wellenleitern in Freistrahlinrichtung Detektor, bestimmen zu können. Mit diesen Werten lassen sich die Summe der Verluste aus Kopplung vom Wellenleiter in die GISC-Struktur, die Ausbreitungsverluste in der GISC-Struktur selber, das Einkoppeln und die Ausbreitungsverluste in und durch das Indexmatching, das Einkoppeln in die GRIN-Linse und die Ausbreitungsverluste in der GRIN-Linse, ermitteln. Diese bilden gemeinsam das Steckerkonzept und stellen damit den gesuchten „Koppelverlust eines GISC-Steckers“ da.

Im Projekt wurde für diese Größe ein Wert von 2,7 dB als bester Wert ermittelt, mit einer Standardabweichung (bei 3 Wellenleitern nebeneinander mit der exakt gleichen GISC Struktur) von 0,11. Dies stellt eine höhere Dämpfung da als das sehr ambitionierte Ziel von 0,5 dB, kann für eine solch justagetolerante Oberflächenauskopplung, jedoch trotzdem als Erfolg gesehen werden und in einigen späteren Anwendungen bereits ausreichen.

*Fazit: In diesem Arbeitspaket konnte erfolgreich mithilfe der GISC-Strukturen in selber halbpolierte GRIN Linsen eingekoppelt werden, sodass an der Stirnfläche der Linse ein Signal detektiert werden konnte. Dies stellt somit neben dem Prisma (AP3) und der spiegelsymmetrischen Anordnung zweier GISC-Profilen (AP4), eine dritte Möglichkeit dar Licht auszukoppeln. Dabei wird auch hier mithilfe der GISC Struktur Licht aus einem vergrabenen Wellenleiter, ohne eine Modifikation der Glasoberfläche, das optische Signal aus eben dieser ausgekoppelt. Wie in AP4 zeigt sich eine hohe Justagetoleranz, allerdings konnten die angestrebten  $<0,5$  dB als Koppelverluste nicht gezeigt werden. Die Messwerte lassen jedoch darauf schließen, dass der Wert von 2,7 dB keinesfalls der kleinste mit dieser Methode erreichbare Wert ist.*

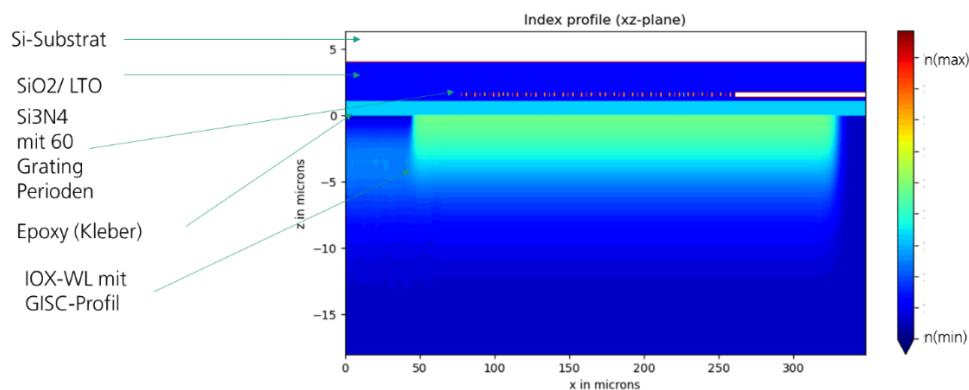
## Arbeitspaket 6: Kopplung Glas – Gitterkoppler

Im 6. Arbeitspaket war es das Ziel die Kopplung von Glas und einem Gitterkoppler in Siliziumtechnik zu demonstrieren. Zur Bestimmung der idealen Gitterparameter wurden umfangreiche Simulationen durchgeführt. Dafür wurde die in Abbildung 11 dargestellte Konfiguration für das optische Gitter gewählt.



**Abbildung 11:** Schematischer Aufbau der Siliziumchips mit integrierten Lichtwellenleitern, die auch als Grundlage für die Gitter dienen.

Dies wurde, wie in **Abbildung 12** dargestellt, in Lumerical aufgebaut und es wurden Sweepsimulationen für verschiedene Füllfaktoren durchgeführt. Zudem wurden Gitterkrümmungen und Taperwinkel untersucht.

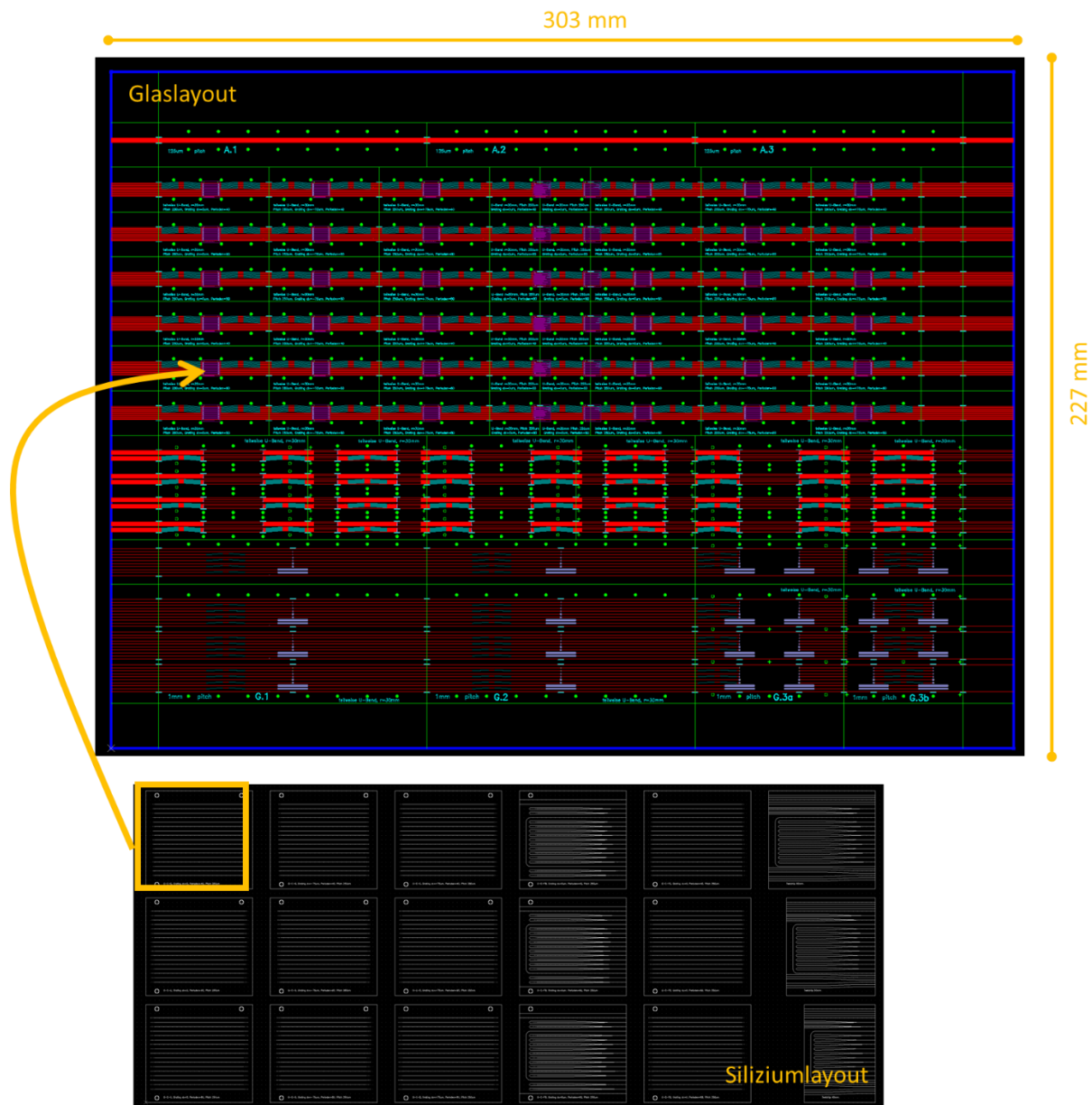


**Abbildung 12:** Ausschnitt aus der optischen Simulation mittels Ansys Lumerical.

Zudem wurden Messkonzepte erarbeitet die es ermöglichen einzelne Verlustkomponenten (Koppel- und Ausbreitungsverluste) messen zu können um somit die einzelnen Komponenten in den Dämpfungsmessungen voneinander trennen zu können.

Sowohl die Simulationen, als auch die Messkonzepte gingen in ein umfangreiches Layout für die Glasboards ein, als auch in ein Layout für die Siliziumchips. Beide Layouts enthalten

Strukturvariationen (Sweeps) und vielfältige Referenzstrukturen. In der Projektlaufzeit konnten die Siliziumchips nicht mehr gefertigt werden. Aufgrund von Mehrarbeit in vorgegangenen Arbeitspaketen und auch daraus folgenden höheren Anforderungen an das Layout, welches in Abbildung 13 dargestellt ist, wurden die Mittel in Vorversuche und das Layouten investiert. Daher müssen die Versuche mit prozessierten Si-Chips auf zukünftige Arbeiten verschoben werden.



**Abbildung 13:** Layouts des Glasboards und eines Ausschnittes eines Siliziumwafers. Die rechteckigen Chips die aus dem Wafer ausgesägt werden passen auf die im Glaslayout lila eingefärbten Bereiche und ermöglichen so verschiedene Koppelszenarien zwischen Glas und Silizium. Außerdem besitzen die Siliziumchips vielfältige Referenzstrukturen, sodass diese vor dem Aufbringen auf das Glas charakterisiert werden können sodass die Verluste auf den Chips selber im Anschluss herausgerechnet werden können, sodass sich die Koppelleffizienz ermitteln lässt.

*Fazit: In diesem Arbeitspaket wurde ein großer Aufwand in Simulationen und das Layouten investiert, sodass als Ergebnis ein Layout mit optimierten Strukturparametern vorliegt und zudem umfangreiche Messkonzepte ausgearbeitet wurden, sodass aus den in Zukunft zu fertigenden Si-Chips sehr viele Informationen entnommen werden können. Leider konnte dieses Arbeitspaket somit nicht experimentell abgeschlossen werden. Die geleisteten Arbeiten haben jedoch einen hohen Wert und werden als vielversprechende Vorarbeiten für weitere Projekte verwertet werden können.*

## **Arbeitspaket 7: Funktionsdemonstration und Optimierung**

Da in den vorhergegangenen Arbeitspaketen, beispielsweise aufgrund der in AP3 ermittelten Effekte, bereits Optimierungen (neue Layouts und Proben) notwendig waren wurden die Ressourcen aus AP7 in den Arbeitspaketen mitverwendet. Auch die Funktionsdemonstration und Prüfung der angestrebten Zielparameter wurden in den einzelnen Arbeitspaketen, entsprechend des jeweiligen Koppelprinzips, durchgeführt.

*Fazit: Die Optimierungen der Layouts und damit der Glasproben waren erfolgreich und konnten so hervorragenden Justagetoleranzen und spektrale Breiten erreichen. Die erzielte Koppelleffizienz war mit minimal 2,7 dB deutlich höher als der Zielwert, jedoch ist eine Koppelleffizienz von unter 3 dB für einige Anwendungen, bei denen zum Beispiel die Justagetoleranz eine große Rolle spielt, nutzbar.*