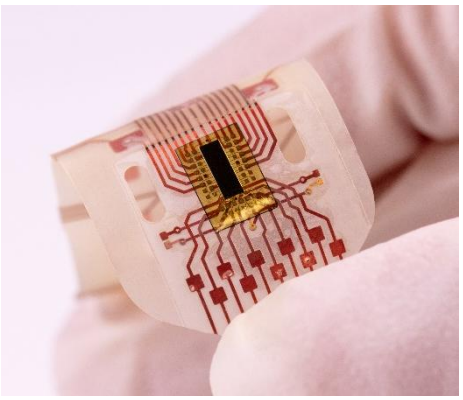


FKZ: 16ME0470

Schlussbericht für NanoWired GmbH

HyPerStripes

Hybrid integrated high performance electronic stripes

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzbericht ... 2
1.1 Aufgabenstellung ... 2
1.2 Stand der Technik zum Projektstart ... 2
1.3 Durchführung des Projekts ... 2
1.4 Ergebnisse ... 3
2 Detaillierter Projektbericht ... 4
2.1 Demonstratoren ... 4
2.1.1 Osypka Use Case (Metallgehäuse) ... 4
2.1.2 Osypka Use Case (Chip-Film-Patch) ... 4
2.1.3 Osypka Use Case (FPC - FPC) ... 5
2.1.4 Philips Use Case (FPC - Chip) ... 5
2.2 NanoWiring-R2R-Prozesskammer ... 6
2.3 NanoWiring für die Projektpartner ... 7
2.3.1 Osypka Use Case ... 9
2.3.2 Philips Use Case ... 10
2.4 Assembly für die Projektpartner ... 10
2.4.1 Osypka Use Case (Metallstift - FPC) ... 11
2.4.2 Osypka Use Case (Kermaikplatine - FPC) ... 12
2.4.3 Osypka Use Case (Chip-Film-Patch - FPC) ... 14
2.4.4 Osypka Use Case (FPC - FPC) ... 14
2.5 Verwertung ... 15
2.5.1 KlettWelding-Tape ... 15
2.5.2 Airbus – Großflächige Metallgitter ... 15
2.5.3 WIKA – FPC auf Dünnschicht-Sensor ... 16

1 Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

NanoWired verfolgte im Förderprojekt das Ziel, seine neuartige Verbindungstechnologie auf die HyperStripes-Anwendungsfälle zu übertragen, die NanoWiring-Produktionsanlage zu einem Roll-to-Roll-Prozess auszubauen und die Fertigungsprozesse entsprechend anzupassen. Zudem wurden die von den Anwendungs-Partnern bereitgestellten Komponenten beschichtet und Muster aufgebaut. Diese Muster konnten von den Partnern getestet, entsprechend weiterverarbeitet und zu finalen Demonstratoren aufgebaut werden. Überdies wurde die Interconnection-Technologie in die gemeinsame Technologieplattform integriert.

1.2 Stand der Technik zum Projektstart

Der NanoWiring-Prozess ist ein galvanisches Verfahren, das bei Raumtemperatur metallische Mikrostrukturen mit Drahtdurchmessern von 1 µm oder weniger erzeugt. Nach der Beschichtung können je nach Anwendung verschiedene Fügetechnologien wie KlettWelding, KlettSintering oder KlettGlueing eingesetzt werden. Diese ermöglichen sehr niedrige elektrische Widerstände und hohe Wärmeleitfähigkeiten.

Zu Projektbeginn erfolgt die Herstellung vollautomatisch im Batch-Verfahren auf einer Größe von 300 x 400 mm^2. Die Substrate werden der Prozesskammer manuell in einer Art Schublade zugeführt. Eine Beschichtung von Rollenmaterial ist nicht möglich. Für die im Projekt verwendeten HyPerStripes musste die Anlage entsprechend erweitert werden. Ebenso gab es noch keinen Prozess um dehnbare Materialien wie TPU zu beschichten. Die Anpassung der Prozesschemikalien war wesentlicher Bestandteil dieses Entwicklung und wird weiter unten näher erläutert.

Neben der Beschichtung mussten auch die Fügeverfahren angepasst werden. Zu Projektstart gab es noch keine Erfahrung mit flexiblen Materialien wie TPU. Die Fügeparameter (z.B. Druck, Temperatur, Klebstoff) und Werkzeuge (z.B. Tool für Die-Bonder), um die sehr unterschiedlichen Substrate und Komponenten fügen zu können, mussten im Rahmen des Vorhabens entwickelt und bereitgestellt werden.

1.3 Durchführung des Projekts

Zu Beginn des Projekts lag der Schwerpunkt auf der Analyse der bestehenden NanoWiring-Prozesse und der Ableitung der technischen Anforderungen für eine zukünftige kontinuierliche Fertigung. Dabei wurde insbesondere untersucht, welche Prozessschritte aus dem bisherigen Batch-Verfahren in ein Roll-to-Roll-System (R2R) übertragen werden können und welche technologischen Anpassungen erforderlich sind. Parallel dazu wurden die Bedarfe der Projektpartner Osypka und Philips aufgenommen, um deren spezifische Anforderungen an flexible, miniaturisierte und prozessstabile Interconnects direkt in die Entwicklungsplanung einfließen zu lassen. Die Ergebnisse wurden im Meilenstein 1 zusammengefasst und abgeschlossen

Nach der Festlegung der Spezifikationen wurden die Analyse der Materialien und ersten Vorversuchen gestartet. In mehreren Iterationen wurden unterschiedliche Substrate auf ihre Eignung für den NanoWiring Prozess untersucht, darunter Polyimid, TPU und PET. Ein wesentlicher Meilenstein war die Entwicklung eines neuen dreistufigen Stripping-Verfahrens, das speziell für empfindliche Polymere, wie z.B. TPU, geeignet ist. Dieses Verfahren wurde nach umfangreichen Versuchsreihen etabliert und später in die Serienprozessplanung integriert.

Parallel zur Material- und Prozessentwicklung wurde die Prozesskammer für den R2R-Prozess konzipiert, konstruiert und aufgebaut. Die Entwicklung einer zweistufigen Prozesskammer, die Anwachs- und Längenphase voneinander trennt, war ein zentraler Schritt und wurde noch während des Projekts zum Patent angemeldet.

Mit Hilfe der neuen Prozesse und Anlage fanden die ersten Beschichtungsreihen statt, in denen unterschiedliche Drahtgeometrien getestet wurden. Wie bereits beschrieben, stellte dabei vor allem das Stripping eine große Herausforderung dar. Für Osypka konnten schon früh erste FPCs beschichtet werden.

Nach Abschluss der Grundlagenphase mit Meilenstein 3 begann die Fertigung der Demonstratoren. Für Osypka wurden vier Verbindungsvarianten aufgebaut und in mehreren Schleifen optimiert. Der Aufbau erfolgte teilweise zusammen mit den Projektpartnern (IMS Chips und Osypka) in den Laboren von NanoWired. Die elektrische Funktionalität und mechanische Festigkeit wurden vor Ort zusammen getestet und validiert.

Gegen Ende des Projekts wurden die Erkenntnisse in ein einheitliches Prozesskonzept überführt. Der neue R2R-Prozess wurde final dokumentiert und erste Kostenschätzungen durchgeführt. Letzteres war notwendig, da Gespräche über konkrete Folgeprojekte mit Kunden geführt wurden, die an dem neuen kontinuierlichen Prozess Interesse gezeigt haben.

1.4 Ergebnisse

Das Hauptziel des Projekts bestand darin, Demonstratoren für die Partner Philips und Osypka zu entwickeln. Dazu wurden verschiedene Substrate wie Polyimid, PET, TPU und Chip-Film-Patches von IMS mit metallischen Nanodrähten beschichtet. Das NanoWiring der Substrate lief wie geplant. Besonders anspruchsvoll war jedoch der Stripping-Prozess für TPU-Substrate, da herkömmliche Verfahren zum Ablösen der Kupferleiterbahnen führten. Dieses Problem konnte erfolgreich durch eine dreistufige Methode gelöst werden, bestehend aus NaOH-Ätzung, DI-Wasser-Spülung und O_2-Plasma-Reinigung.

Für den Philips-Use-Case wurden Wafer mit Nanodrähten versehen. Mehr als zehn Wafer mit unterschiedlichen Ätzparametern wurden getestet, um eine optimale Schichtstruktur zu erzielen. Die Nanodrähte hatten einen Durchmesser von etwa 1 µm, während die Pads rund 50 µm groß waren. Die Startschicht für die elektrochemische Abscheidung wurde von Philips aufgebracht und anschließend wieder entfernt.

Im Bereich der Fügetechnologien kamen sowohl KlettWelding als auch KlettGlueing zum Einsatz. KlettWelding wurde zur Verbindung von FPC-FPC eingesetzt, wobei die optimale Fügekraft bei 800 N lag. TPU-Substrate konnten dabei bis zu 52 mm gedehnt werden, bevor die Verbindung versagte. KlettGlueing wurde zur Verbindung von Elektroden-Patch und Chip-Film-Patch genutzt und durch Klebstoff zusätzlich unterstützt. Die Justierung der flexiblen Chip-Film-Patches stellte eine besondere Herausforderung dar, da die Metallpads leicht zurückgesetzt waren. Durch Fixierung auf einer Glasplatte und eine optimierte Druckverteilung konnte jedoch eine stabile Verbindung erreicht werden.

Alle Demonstratoren wurden erfolgreich mechanisch und elektrisch getestet, wobei sich die entwickelten Prozesse als zuverlässig und wiederholbar erwiesen.

2 Detaillierter Projektbericht

2.1 Demonstratoren

2.1.1 Osypka Use Case (Metallgehäuse)

- Verbindungspartner: Distale Seite FPC (TPU) + Keramikplatte (Metallgehäuse)
- Technologie: KlettGlueing (NanoWiring auf FPC)
- Klebstoff: Panacol Structalit 8202
- Fügekraft: 150 N
- Aushärtungstemperatur: 100 °C
- Aushärtezeit: 40 min
- Montagevorrichtung: Fineplacer Pico (Platzierung) + Darto PM10 (Pressen)
- NW-Durchmesser: 1 µm
- Ergebnis: Mechanisch stabil, elektrisch funktionsfähig

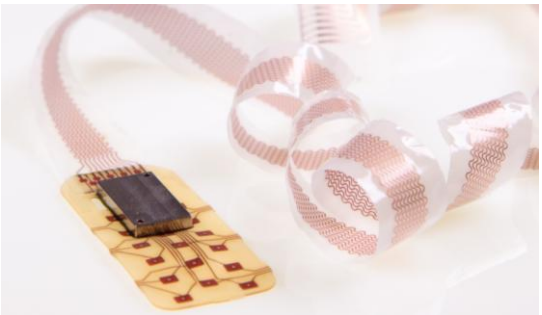


Abbildung 1: Osypka-Demonstrator; Proximales Ende, distales Ende und Keramikplatte (Metallgehäuse)

2.1.2 Osypka Use Case (Chip-Film-Patch)

- Verbindungspartner: Distales End-FPC (TPU) + Chip-Film-Patch (IMS)
- Technologie: KlettGlueing (NanoWiring auf FPC)
- Klebstoff: Panacol Structalit 8202
- Fügekraft: 40 N
- Aushärtungstemperatur: 100 °C
- Aushärtezeit: 40 min
- Montagevorrichtung: Fineplacer Pico (Platzierung) + Darto PM10 (Pressen)
- NW-Durchmesser: 1 µm
- Ergebnis: Mechanisch stabil, elektrisch funktionsfähig

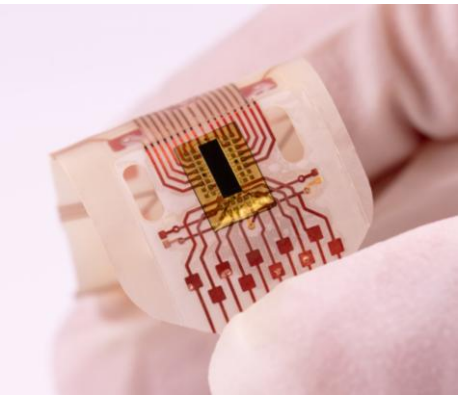


Abbildung 2: Osypka-Demonstrator; Distales Ende mit Chip-Film-Patch (IMS)

2.1.3 Osypka Use Case (FPC - FPC)

- Verbindungspartner: Distale End-FPC (TPU) + Proximale End-FPC (TPU)
- Technologie: KlettWelding (Nanoverdrahtung auf beiden FPCs)
- Klebstoff: -
- Fügekraft: 800 N
- Aushärtungstemperatur: -
- Fügezeit: 1 s
- Montagevorrichtung: Fineplacer Pico (Platzierung) + Darto PM10 (Pressen)
- NW-Durchmesser: 1 µm
- Ergebnis: Mechanisch stabil, elektrisch funktionsfähig

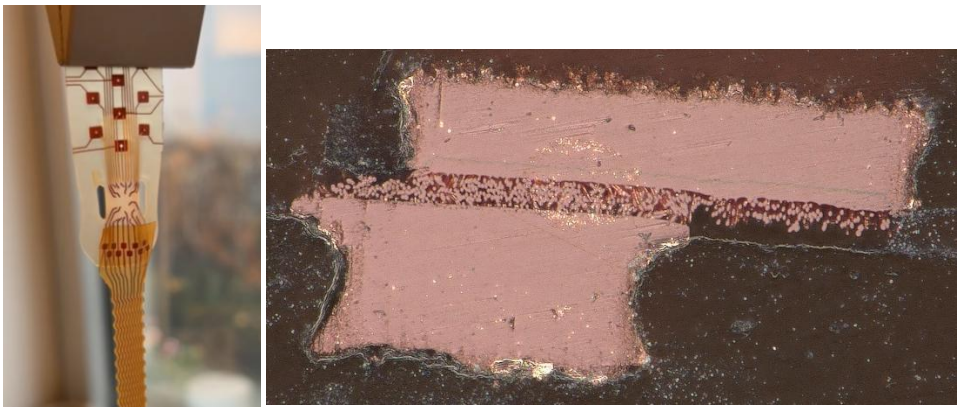


Abbildung 3: (links) Distale und proximale Enden, die mit KlettWelding in der Zugprüfmaschine verbunden sind; (rechts) Querschnitt eines Pads; Die ineinandergreifenden Nanodrähte sind zu sehen

2.1.4 Philips Use Case (FPC - Chip)

- Partner beitreten: Chip + FPC (TNO)
- Technologie: KlettWelding (NanoWiring bei beiden Partnern)
- Klebstoff: -
- Fügekraft: -
- Aushärtungstemperatur: -
- Fügezeit: -
- Montagevorrichtung: Fineplacer Pico
- NW-Durchmesser: 1 µm
- Ergebnis: NanoWiring erfolgreich; Abschluss nach Projektende

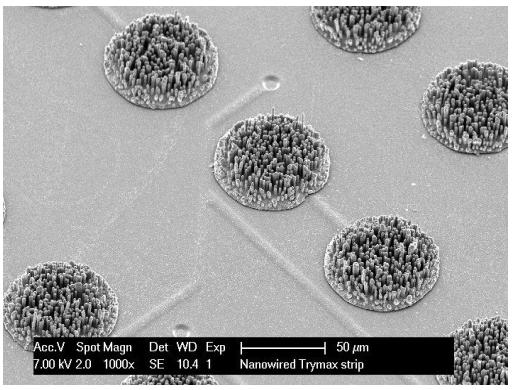


Abbildung 4: Pads mit NanoWiring für die KlettWelding-Verbindung

2.2 NanoWiring-R2R-Prozesskammer

NanoWiring ist die Beschichtung von Substraten mit metallischen drahtförmigen Nanostrukturen. Es ist die Grundlage für alle NanoWired-Verbindungstechnologien. Dieser Prozess wird üblicherweise im NanoWiring-Cube durchgeführt. Es handelt sich um einen Batch-Prozess mit einer aktiven Beschichtungsfläche von 300 mm x 400 mm.

Der Prozess kann in drei Phasen unterteilt werden: Anwachs-Phase (1), Längen-Phase (2) und Stripping-Phase (3). Phase 1 und 2 werden im NanoWiring-Cube durchgeführt, Phase 3 ist ein Reinigungsprozess und wird in einer separaten Maschine durchgeführt. Jeder Prozess besteht aus diesen 3 Phasen in dieser Reihenfolge. Das Problem ist, dass die Prozesszeiten der drei Phasen völlig unterschiedlich sind. Das macht es unmöglich, sie 1:1 in einen kontinuierlichen R2R-Prozess zu übertragen. Die Prozesskammer wird hierfür in zwei Zonen unterteilt. Zone 1 für die Anwachs-Phase und Zone 2 für die Längen-Phase.

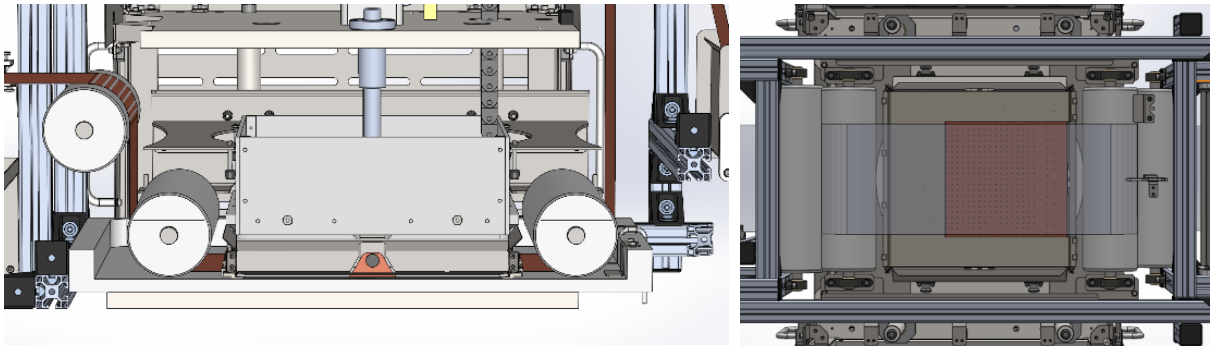


Abbildung 5: Modifizierte Prozesskammer für den R2R-NanoWiring-Prozess; Seitenansicht des Stempels (links); Unteransicht des Stempels; Elektrode mit zwei Abscheidungszonen (rechts)

Abbildung 5 rechts zeigt die modifizierte Kammer. Im linken Drittel befindet sich vor der Elektrode das NanoWiring-Schwammsystem. Dieses wird benötigt, damit direkt zu Beginn des Prozesses die Drähte anfangen, in ihre typische Form zu wachsen. Nach ca. 10 Minuten ist dieser Prozess abgeschlossen. Danach fährt der HyperStripe um 10 cm weiter und befindet sich nun im mittleren Drittel des Stempels. Hier und im rechten Drittel liegt die Elektrode frei. Die jetzt „angewachsenen“ Drähte wachsen auf ca. 50% ihre finale Länge. Nach 10 Minuten fährt der HyperStripe vor das rechte Drittel. Hier wiederholt sich Schritt 2. Die Drähte haben nun ihre finale Länge. Durch dieses System befindet sich jede Stelle auf dem HyperStripe, 10 Minuten in der „Anwachs-Phase“ und zwei Mal 10 Minuten in der „Längen-Phase“.

Dieser neue Prozess inklusive Prozesskammer wird im Rahmen des Projekts auch zum Patent angemeldet.

Die gesamte R2R-NanoWiring Maschine ist in Abbildung 6 dargestellt.

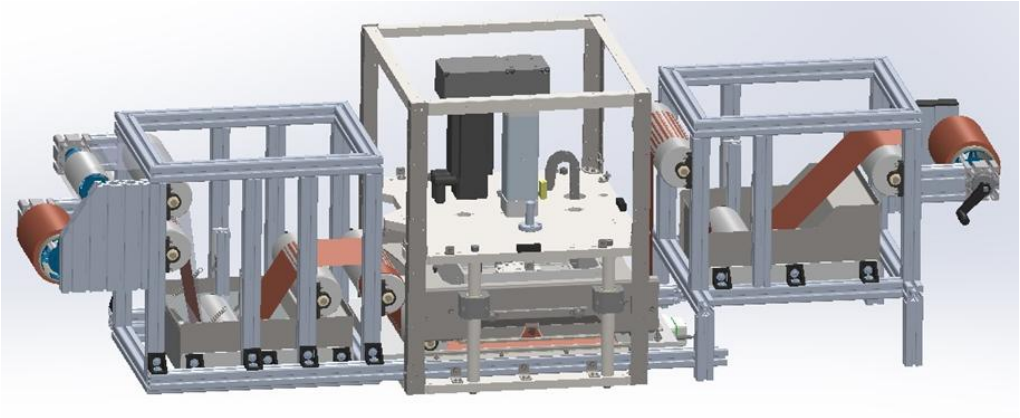


Abbildung 6: Komplette R2R-NanoWiring-Maschine mit drei Zonen: 1) Vorbereitung des HyperStripes für NanoWiring; 2) NanoWiring; 3) Reinigung und Aufrollen

Für den Aufbau des R2R-Systems wird ein bisheriger NanoWiring-Cube für den Batch-Prozess umgebaut und erweitert. Die Zuführung des Materials erfolgt zunächst noch manuell. Da im Rahmen des Projekts kaum Rollenmaterial zur Verfügung steht, wird die Inbetriebnahme mit einer Kupferfolie anstelle eines FPCs durchgeführt. Diese dient als Kernmaterial für das KlettWelding-Tape. Langfristig wird dies für NanoWired auch die Hauptverwendung für das R2R-System sein.

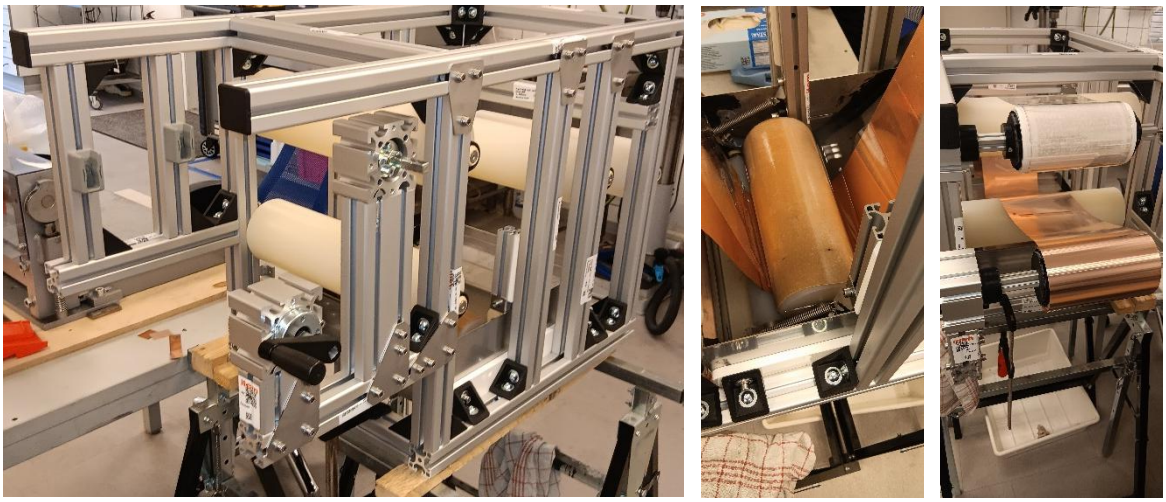


Abbildung 7: (links) Aufbau der R2R-Maschine (links); (Mitte) Die Kupferfolie und die Porositätsfolie werden in einem DI-Wasser Becken zusammengeführt, um keine Luftblasen einzuschließen; (rechts) Ausgangsmaterialien sind die Porositätsfolie auf Rolle sowie für die KlettWelding-Tape-Tests eine Kupferfolie

2.3 NanoWiring für die Projektpartner

Ein wesentliches Arbeitspaket von NanoWired, ist das Aufbringen der metallischen Nanodrähte auf Partnersubstrate. Standardmäßig kann hierfür Polyimid als flexibles Substratmaterial eingesetzt werden. Im Rahmen des Vorhabens wurde überdies PET, TPU und die Chip-Film-Patches des Projektpartners IMS beschichtet. In Abbildung8 ist beispielhaft die Beschichtung auf PET (links) und TPU (rechts) dargestellt. Das PET-Material hat noch kein Coverlay. Zur Maskierung wird bei NanoWired eine Folie aufgeklebt. Die TPU-Substrate rechts besitzen bereits ein Coverlay. Hier wird von Würth direkt eine zweite 100µm dicke TPU Lage auf das Kupfer-Layer auflaminiert.

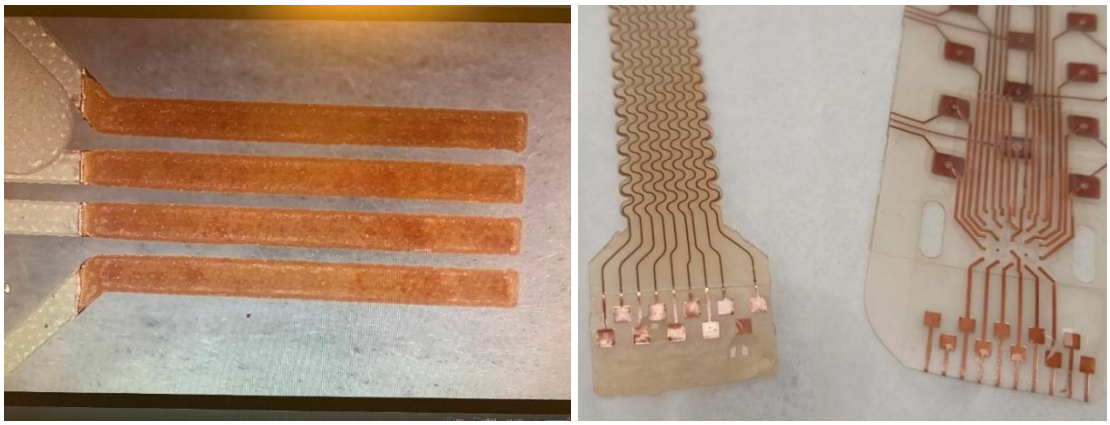


Abbildung 8: (links) PET-Folie mit gedruckten Silberleiterbahnen für den Philips Use-Case von TNO; (rechts) TPU-Folien für den Osypka Use-Case von Würth

Diese neuen Materialien machen eine Anpassung des Prozesses notwendig. Vor allem der Stripping-Prozess muss komplett umgestellt werden. Dieser folgt nach dem NanoWiring und dient dazu, die Porositätsschicht zu entfernen. Standardmäßig werden hierfür Lösemittel eingesetzt. Dies ist aufgrund der neuen Materialien jedoch nicht möglich, da diese vom Lösemittel angegriffen werden.

Zu Projektbeginn wird ein Alternativprozess mit NaOH als Ätzmedium erarbeitet. Dieser funktioniert allerdings nur mit Coverlay und bei kleinen Pad-Öffnungen. Betrachtet man das Coverlay in Abbildung 8 (rechts), so ist dieses an den Pads, sowie an der Position der Platine geöffnet, da diese ebenfalls eben auf dem unteren TPU-Layer aufliegen muss. Dadurch liegen längere Kupferleiterbahnen frei, was beim Stripping-Prozess zu großen Problemen führt. In Abbildung 9 ist auf der linken Seite zu erkennen, wie sich die Leiterbahnen von dem Polymer ablösen. Die Substrate sind so nicht zu gebrauchen.

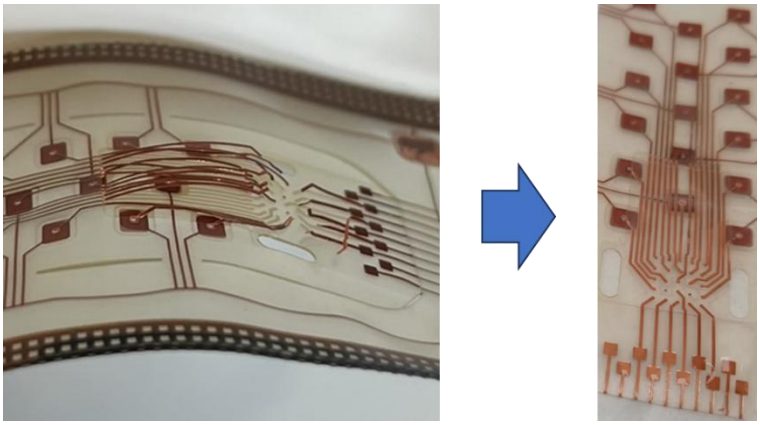


Abbildung 9: Ablösen der Kupferleiterbahn (links); Optimierter Prozess ohne Ablösen (rechts)

Eine umfangreiche Prozessentwicklung führt schlussendlich zu einem dreistufigen Prozess. Nach einem kurzen Ätzprozess mit NaOH (5 min) werden die angelösten Polymerreste mit einer DI-Wasser-Düse abgewaschen. Die verbleibenden Rückstände werden danach im O2-Plasma (ca. 30min) entfernt. Das Ergebnis ist in Abbildung 9 rechts zu sehen. Es kommt zu keiner Kupferablösung. Alle finalen Demonstratoren werden mit diesem Prozess aufgebaut.

2.3.1 Osypka Use Case

Für den Osypka-Use Case werden vier Verbindungen mit NanoWired-Interconnects realisiert. Beginnend beim Batteriegehäuse, besteht die erste Verbindung zwischen dem „Long-Stripe“ und dem Metallstift. Der Metallstift wird anschließend an das Batteriegehäuse geschweißt. Das zweite ist die Verbindung zwischen dem „Long-Stripe“ und dem Elektrodenpatch. Es handelt sich um eine FPC-zu-FPC-Verbindung. Auf dem Elektrodenpatch ist die Keramik mit der Elektronik zur Signalverarbeitung montiert. Diese Keramik-zu-FPC-Verbindung ist Nummer drei. Der IMS-Chip auf der Keramik verwendet ebenfalls NanoWired-Technologie für interne Verbindungen, Nummer vier.

Das FPC-Material für den Osypka-Use Case wird von Würth bereitgestellt. Für den NanoWiring-Prozess ist insbesondere das Coverlay interessant. Das Coverlay dient direkt als Maske und definiert den Bereich, in dem die Beschichtung stattfindet. Für den NanoWiring-Prozess ist es mit 100µm allerdings etwas dick. Das Schwammsystem muss diesen Abstand in den Öffnungen ausgleichen. Dadurch kommt es zu geringerem Anpressdruck und parasitärem Wachstum (siehe Abbildung10). Eine Lösung ist die Reduzierung der Coverlay-Dicke. Würth untersucht daher parallel auch die Fertigung mit 50µm statt 100µm dickem Material. Die Ergebnisse werden in deren Ergebnisbericht dargestellt.

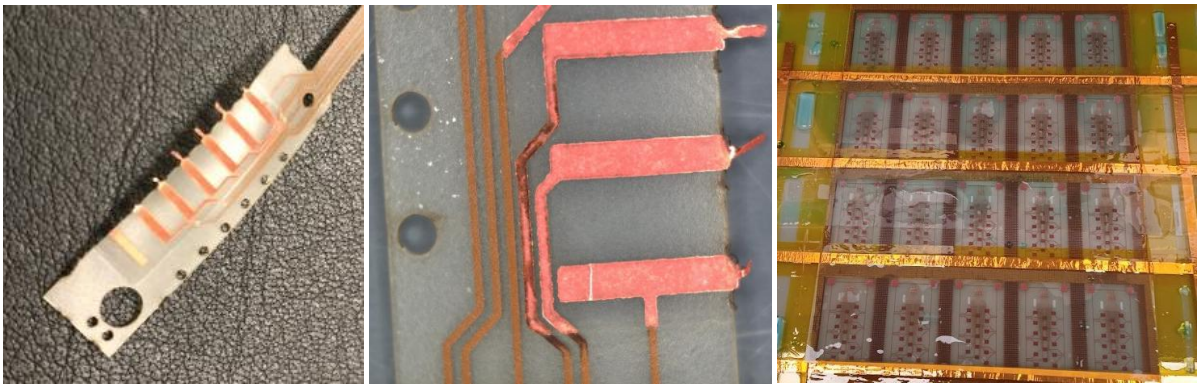


Abbildung 10: (links) NanoWiring auf „Long Stripe“ Pads für Metallstiftverbindung ; (Mitte) Parasitäres Seitenwachstum auf Leiterbahnen, wo die Deckschicht geöffnet ist; (rechts) NanoWiring auf dem Elektrodenpatch in der Prozesskammer

Eine weitere Möglichkeit das parasitäre Wachstum zu reduzieren, ist die Vergrößerung der Öffnungen, dass alle Pads in einem großen geöffneten Bereich liegen. Dies wurde in der Revision 2 und Revision 3 sukzessive umgesetzt.

Das NanoWiring der IMS-Wafer erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem IMS. Dort werden die Metallisierungs- und Lithografieschritte durchgeführt, welche die Grundlage für den NanoWiring-Prozess darstellen. Die elektrische Ankontaktierung jedes einzelnen Pads und das Entfernen des Fotolacks sowie der Seed-Metallisierung stellt zu Beginn eine große Herausforderung dar. Zur Optimierung der Ankontaktierung wurde ein extra Layout erstellt. Der Fotolack wurde so angepasst, dass er leichter zu entfernen ist.

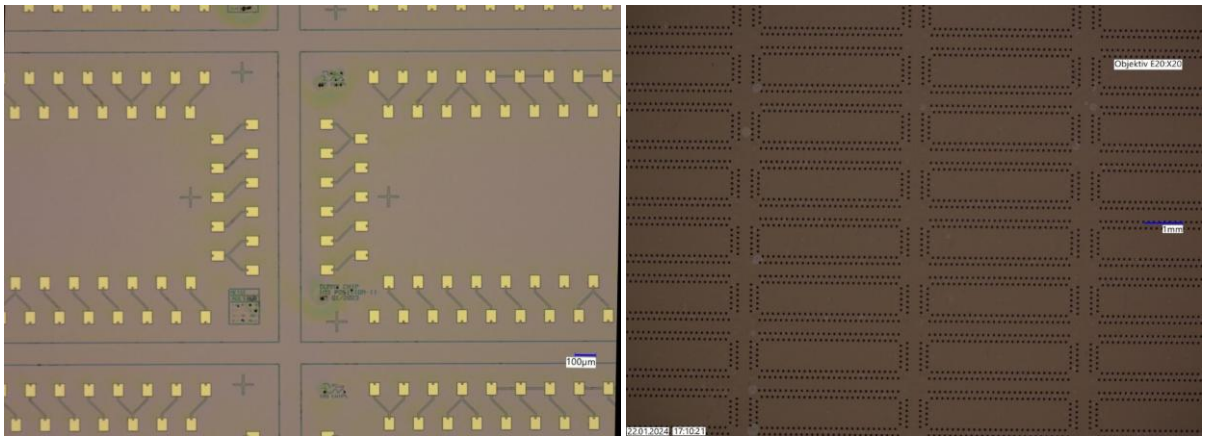


Abbildung 11: Fotolack mit geöffneten Pads auf einem IMS-Wafer (links); Nach NanoWiring (rechts)

Für den NanoWiring-Prozess wurden vor allem zwei Dinge weiterentwickelt. Zunächst geht es um die Wahl des richtigen NanoWiring-Parameters. Standardmäßig wird für Sinterverbindungen ein Drahtdurchmesser von 100 nm (30 % Porosität) und für KlettWelding und klebstoffgestützte Verbindungen ein Drahtdurchmesser von 1 µm (18 % Porosität) verwendet. Um bei empfindlichen Chips mit weniger Druck arbeiten zu können, werden auch 400 nm Durchmesser mit einer Porosität von 20 % für Kalt- und Klebeverbindungen untersucht. Im Bericht des Projektpartner IMS wird hierauf noch einmal detailliert eingegangen.

2.3.2 Philips Use Case

Für den Philips Use-Case werden zudem Wafer mit Nanodrähten beschichtet. Diese besitzen kleineren, ca. 50µm großen Pads. Auch hier wird ein Drahtdurchmesser von 1µm gewählt. Die Startschicht zum Kurzschluss der Pads (für elektrochemische Abscheidung notwendig) wird von Philips aufgebracht und auch wieder entfernt. Hierfür werden mehr als 10 Wafer prozessiert, um den richtigen Schichtaufbau und die entsprechenden Ätzparameter zu finden. Abbildung12 zeigt unterschiedliche Pads auf den Wafern.

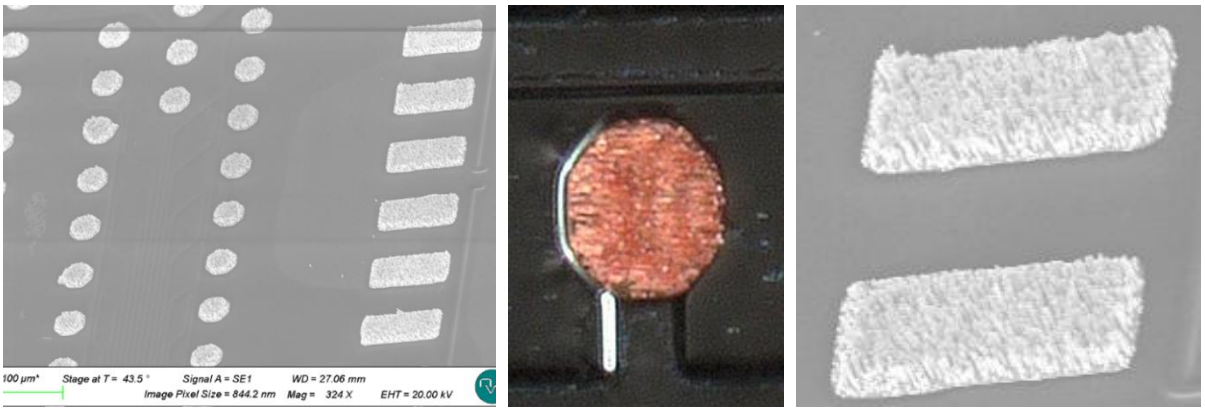


Abbildung 12: NanoWiring-Pads auf 8"-Wafern von Philips

2.4 Assembly für die Projektpartner

In diesem Abschnitt werden die Entwicklung der Fügeverfahren sowie der Aufbau der Demonstratoren betrachtet. Wie in Abbildung13 zu sehen, wurden für Osypka vier unterschiedliche Aufbauten und Demonstratoren erfolgreich realisiert. Die Verbindung des Long-Stripes mit Metallstiften, des Long-Stripes mit dem Elektroden-Patch sowie die Verbindung von Elektroden-Patch

und Keramikplatine bzw. Chip-Film-Patch. Für die FPC-FPC Verbindung wird KlettWelding eingesetzt, d.h. NanoWiring auf beiden Seiten und Fügen bei Raumtemperatur. Für die drei anderen Verbindungen wird KlettGlueing/KlettWelding-Underfill eingesetzt, d.h. einseitiges/beidseitges NanoWiring und klebstoffunterstützt.

Für den Philips Use-Case wurden Substrate und Wafer beschichtet, der Aufbau steht noch aus.

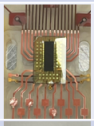
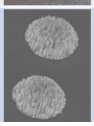
		KlettWelding	KlettGlueing
Osypka Metallstift - FPC			Successfully demonstrated ✓
Osypka Chip-Film-Patch - FPC			Successfully demonstrated ✓
Osypka Ceramic board - FPC			Successfully demonstrated ✓
Osypka FPC - FPC		Successfully demonstrated ✓	
Philips FPC - Chip		Coating done; Assembly in progress	

Abbildung 13: Im Rahmen des Vorhabens realisierte Demonstratoren

2.4.1 Osypka Use Case (Metallstift - FPC)

Zur Verbindung des Metallstifts mit dem FPC wird sogenanntes KlettWelding -Underfill verwendet. Dabei werden beide Bauteile mit der NanoWiring-Beschichtung versehen. Bei der Underfill-Variante wird die Struktur zusätzlich mit einem Kleber unterstützt. Dies wird meist bei flexiblen Materialien angewendet, da diese sehr hohen Schälspannungen ausgesetzt sind. Für die ersten Tests werden die FPCs noch einzeln bearbeitet. Das Fügen erfolgt auf einem Fineplacer pico von Finetech (siehe Abbildung 14).

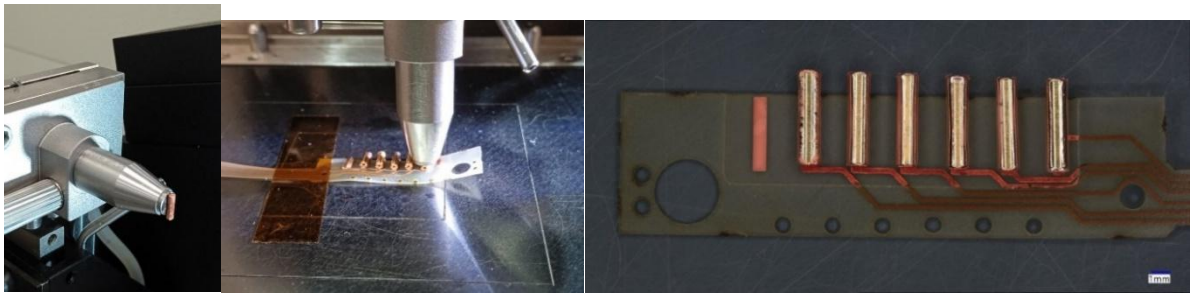


Abbildung 14: Verbinden der Metallstifte auf einem langen Streifen-FPC mittels KlettWelding -Underfill

Die Metallstifte werden mit 20 MPa (122 N) aufgedrückt. Der Druck wird nur ca. 1 Sekunde gehalten. Mit einem automatisierten System wäre dies viel schneller möglich. Sowohl der Bestückkopf als auch die Basis haben Raumtemperatur. Der Fügeprozess erfolgt komplett kalt, da das TPU sehr temperaturempfindlich ist. Nach dem Platzieren des Stiftes wird ein Tropfen Klebstoff kraftfrei auf die Fügezone abgegeben. Dieser zieht sich in die Verbindung und verfestigt diese.

Alternativ kann der Kleber auch gleich zu Beginn auf die Pads aufgetragen werden. Die Drähte durchdringen den isolierenden Kleber und stellen die elektrische Verbindung her.

2.4.2 Osypka Use Case (Kermaikplatine - FPC)

Die Keramikplatten werden auf demselben Fineplacer zusammengefügt wie die Metallstifte. Wie in Abbildung 15 dargestellt, wird hier ein anderer Bestückkopf verwendet. Das FPC liegt wieder auf der Grundplatte, die Keramik wird von oben aufgedrückt. Bei der Technologie handelt es sich um KlettGlueing, d.h. nur eine der beiden Komponenten, in diesem Fall das FPC, weist eine Nanodrahtbeschichtung auf. Werden die beiden Bauteile zusammengepresst, halten sie zunächst nicht zusammen. Die mechanische Festigkeit kommt ausschließlich vom Klebstoff. Das heißt, es wird Klebstoff auf das FPC aufgetragen, die Keramik ausgerichtet, platziert und gedrückt, bis der Klebstoff ausgehärtet ist. Die Fügezeit beträgt ca. 10s bis 600s und ist damit deutlich länger als beim KlettWelding-Underfill. Der verwendete Druck liegt zwischen 3 MPa und 10 MPa (100 N bis 360 N).

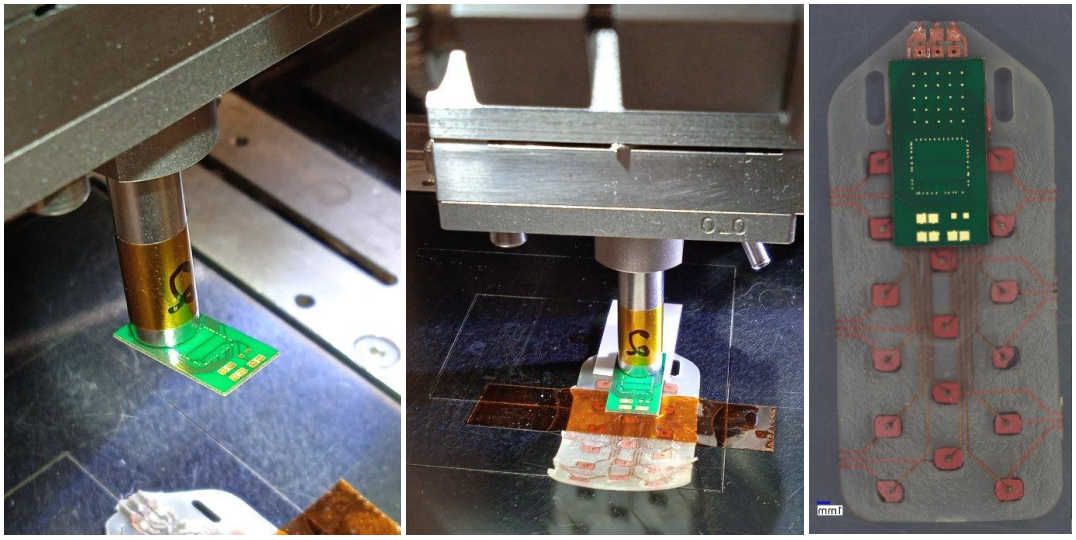


Abbildung 15: Verbindung einer Keramikplatte mit einem Elektrodenpatch-FPC mittels

Auch das Fügen der Keramik ist deutlich anspruchsvoller. Bei zu hohem Druck bricht sie leicht. Dies liegt unter anderem an der nicht angepassten TPU-Coverlay. Dieses Problem ist in Revision 3 gelöst.

Die Verbindung zwischen Keramikplatine inklusive Metallgeghäuse und TPU FPC ist in Abbildung16 dargestellt. Der Klebstoff wird dabei auf das FPC mit NanoWiring dosiert. Anschließend wir die Keramikplatine mit

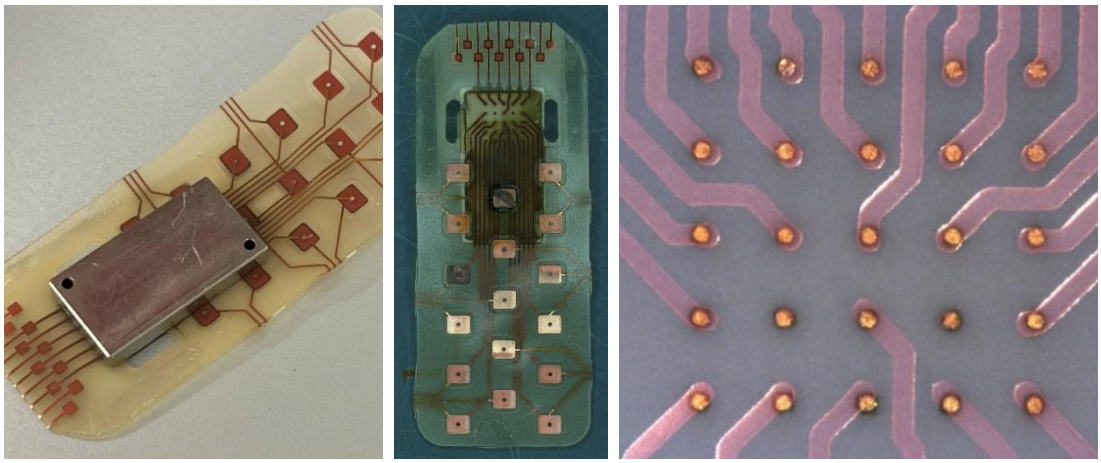


Abbildung 16: (links) Gefügte Keramikplatine mit Metallgehäuse auf dem TPU Elektroden-Patch; (Mitte) Sicht von unten; dunkle Stellen sind Klebstoff; (rechts) Ausrichtung der Gold-Pads im Die-Bonder (Fineplacer) zu den Leiterbahnen auf dem TPU

den Goldpads über einen Fineplacer ausgerichtet und mit ca. 10N platziert. Der Aufbau wird dann in eine Presse (PM10) überführt, die die Komponenten mit 150N verpresst und bei 100°C den Klebstoff aushärtet. Dies ist notwendig, da nur so eine homogene Druckverteilung erreichbar ist. Die Aushärtedauer liegt bei ca. 40min. Als Klebstoff wird der Structalit 8202 von Panacol eingesetzt, ein 1K Epoxy Klebstoff. Mit diesem Prozessablauf konnten mechanisch stabile und elektrisch funktionsfähige Demonstratoren assembliert werden.

Abbildung 17 zeigt die Funktion der Nanodrähte im Fügeprozess, nämlich als elektrische Kontaktfeder. Um den richtigen Anpressdruck beim Fügen zu finden, werden die Chips testweise platziert und wieder entfernt. Der Abdruck der Pads im NanoWiring ist in Abbildung17 zu sehen. Zum einen sind alle Pads getroffen, was bei flexiblen Materialien ebenfalls eine Herausforderung ist. Zum anderen ist der Anpressdruck ideal. Das Nanodraht-Pad hat einen sehr guten Kontakt zum Chip-Pad und das TPU ist nicht verformt. Die Drähte haben hier einen Durchmesser von 1µm, die Pads sind ca. 150µm groß.

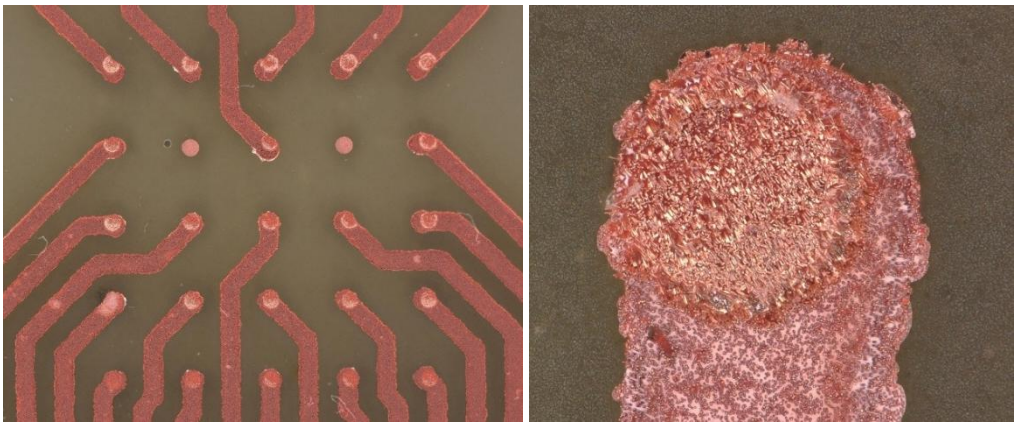


Abbildung 17: TPU-Folie mit NanoWiring-Pads nach einer Testfügung, d.h. das Gegenstück wurde aufgepresst, aber nicht final fixiert; In der Vergrößerung recht sind die au die Seite geknickten Nanodrähte zu sehen.

2.4.3 Osypka Use Case (Chip-Film-Patch - FPC)

Eine größere Herausforderung stellt der Aufbau von Demonstratoren mit den Chip-Film-Patches des Partners IMS dar. Diese sind ebenfalls flexibel, was eine planparallele Ausrichtung schwierig macht. Abbildung18 links zeigt, wie gekrümmt die beiden Fügepartner sind.

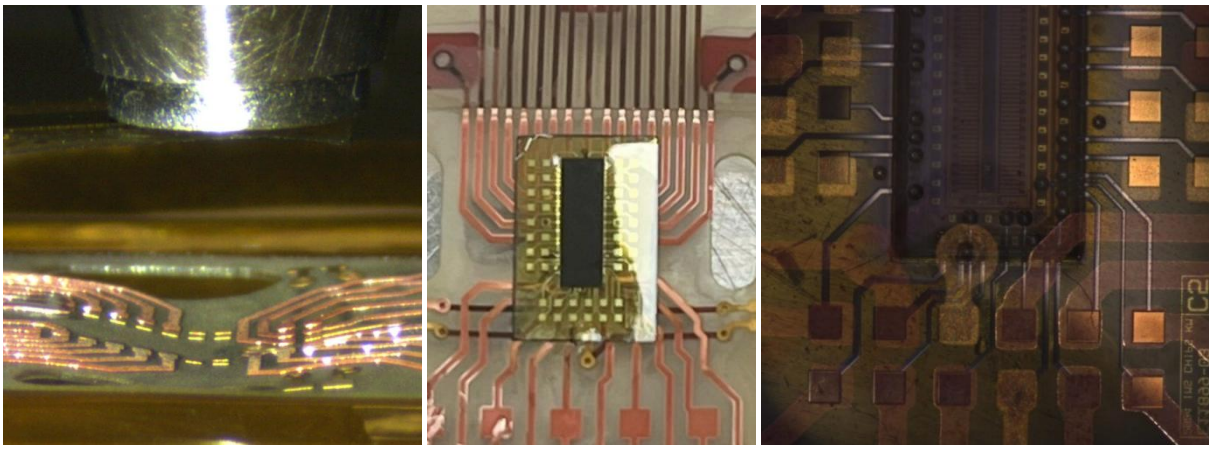


Abbildung 18: (links) Stark gewelltes TPU-FPC mit NanoWiring; (Mitte) Draufsicht auf das gefügte Chip-Film-Patch; (rechts) Nahaufnahme des Chip-Film-Patchs nach der Assemblierung

Durch eine Fixierung des TPU-Substrats auf einer Glasplatte ist die Justage dennoch mit dem Fineplacer möglich. Die nächste Herausforderung ist die Fügekraft. Da die Metallpads ca. 3µm zurückgesetzt sind, ist ein höherer Druck notenwendig, um die Nanodrähte in Kontakt zu bringen. Dies führt aber gleichzeitig zum Herauspressen des Klebstoffs aus der Verbindung. Eine optimierte Druckverteilung mittels Teflonfolie und ein reduzierter Druck erweisen sich als zielführend. Somit werden auch die Chip-Film-Patches mit 10N platziert und anschließend in der PM10 bei 40N verpresst. Mit diesem Prozessablauf können ebenfalls mechanisch stabile und elektrisch funktionsfähige Demonstratoren assembliert werden.

2.4.4 Osypka Use Case (FPC - FPC)

Für die Verbindung von FPC und FPC wird KlettWelding eingesetzt. Beide TPU-Substrate sind mittels NanoWiring beschichtet und werden bei Raumtemperatur verpresst. Höhere Kräfte verformen das TPU dauerhaft, was zu einem direkten Aufbrechen der Verbindung führt. Die ideale Fügekraft liegt bei 800N. Die Festigkeit wird mit Hilfe einer Zugprüfmaschine ermittelt. Abbildung 19 zeigt links die Einspannung im Messstand. Rechts ist das Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Die TPU-Substrate können bis zu 52mm (14N) gedehnt werden, bevor die Verbindung versagt. Die Festigkeitswerte liegen deutlich unter den normalen Festigkeiten beim KlettWelding. Dies liegt an der Scherbeanspruchung sowie der Verformung der Substrate. Für höhere Festigkeiten könnten die Verbindung nachfolgend ebenfalls mit einem Klebstoff verstärkt werden. In der Mitte von Abbildung 19 ist ein Querschliff eines Pads zu sehen. Die Nanodrähte sind perfekt ineinander verhakt.

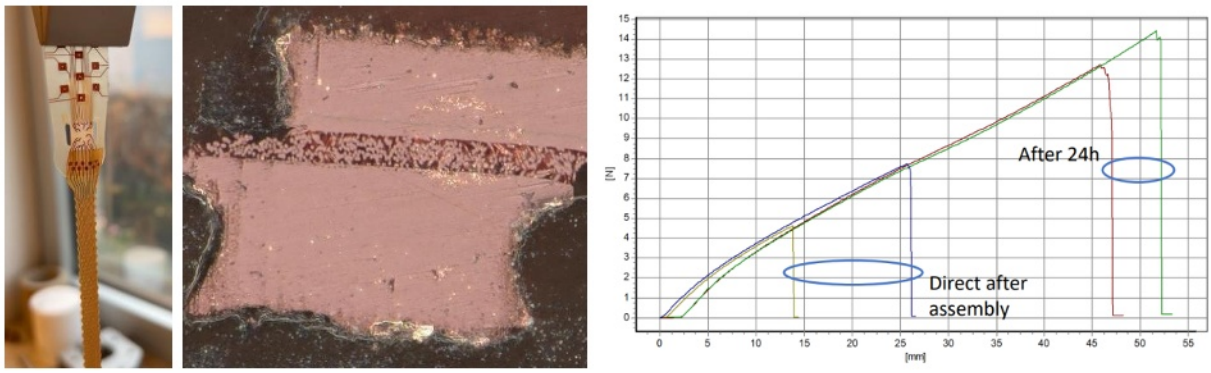


Abbildung 19: (links) Gefügte TPU-Substrate im Zugprüfstand; (Mitte) Querschliff eines Pads; (rechts) Kraft-Weg-Diagramm als Ergebnis bei der Zugprüfung; Das TPU-Substrat wird bis zu 52mm (ca. 25%) gedehnt, bevor die Verbindung versagt

2.5 Verwertung

Wie bei der Antragsstellung geplant, können mit dem R2R-Prozess bestehende Produkte kosteneffizienter produziert und neue Anwendungsbereiche bedient werden.

2.5.1 KlettWelding-Tape

Das KlettWelding-Tape ist eine beidseitig mit NanoWiring beschichtetet Kupferfolie. Es wird von NanoWired als Preform zum Sintern oder als Thermal Interface Material verkauft. Da die Ausgangsstoffe, die Kupferfolie sowie die Porositätsschicht als Rollenware verfügbar ist, eignet sich dieses Produkt besonders für eine R2R Fertigung.

Die Vorversuche im Rahmen des Projekts haben gezeigt, dass die Transformation möglich ist. Prozessschritte wie das Vereinzeln der Rollenware sowie das Handling der Einzel-Folien entfallen. Generell ist ein höherer Grad an Automatisierbarkeit möglich. Diese Faktoren senken die Maschinenkosten, die beim Standard Batch-Prozess ca. 25% der Gesamtkosten betragen, um ca. 50%. D.h. es ist eine Kostenreduktion des Gesamtprozesses von größer 10% realistisch. Dies ist in den sehr preisdominierten Märkten ein entscheidender Vorteil.

2.5.2 [redacted] Großflächige Metallgitter

Mit dem bisherigen Batch-Prozess können Flächen von 300 x 400 mm^2 beschichtet werden. Der Kunde [redacted] möchte aber gerne mehrere Meter lange Metallbahnen mit NanoWiring beschichten.

[redacted]

Dies ist nur in einem R2R-Prozess möglich. Durch das Projekt HyperStripes konnte dem Kunden konkret gezeigt werden, dass der Prozess transformierbar ist. Eine für NanoWired sehr lukrative

neue Anwendung wird, dadurch ermöglicht Die ersten Vorversuche wurden bereits erfolgreich im Jahr 2024 abgeschlossen. In einem Folgeprojekt in 2025 werden weitere Parameter für den Schritt in die Serienüberführung untersucht.

2.5.3 [redacted] – FPC auf Dünnschicht-Sensor

Eine weitere Anwendung, die von den Ergebnissen des Vorhabens profitiert hat, ist die Verbindung von flexiblen Leiterplatten mit Sensoroberflächen. Hier ist [redacted] der Pilotkunde, der in den letzten Jahren eine Serienüberführung unseres Fügeprozesses durchgeführt hat (vgl. Abbildung 21).

[redacted]

Mit neuen Erkenntnissen, die in den Demonstratoren mit dem Partner Osypka entstanden sind, konnte der Fügeprozess beschleunigt werden. Neue Reinigungsprozesse und Klebstoffe wurden erarbeitet und verifiziert. Auch die Fertigungskosten in einer Massenproduktion können durch den R2R Ansatz reduziert werden.