

Teil II: Eingehende Darstellung

Hybrid integrated high performance electronic stripes

-
Capical GmbH

Inhalt

1	Spezifikation	3
1.1	Beschreibung des Anwendungsfalls	3
1.2	Demonstrator: Schlafsensor	3
2	Entwurf des HyPerStripes	5
3	Herstellung der HyPerStripes	8
3.1	Prüfmuster	8
3.2	Demonstrator	9
3.3	Montage und Integration	10
4	Assemblierung	12
4.1	Aktualisierung von Design, Fertigung und Montage	12
4.2	Design und Fertigung	12
4.3	Endmontage	13
4.4	Tests und Evaluierung	13
4.4.1	Testbeschreibung/-definition	13
4.4.2	Testergebnisse	14
5	Zusammenfassung	17
5.1	Bewertung der Projektarbeiten	17
5.2	Fazit	17
5.3	Roadmap zu zukünftigen Produkten	17

1 Spezifikation

1.1 Beschreibung des Anwendungsfalls

Durch Fortschritte in der Sensorik, der Miniaturisierung, der Materialwissenschaft und der Datenanalyse hat die Überwachung physiologischer Daten immer mehr an Bedeutung gewonnen. Dies beschränkt sich nicht nur auf Gesundheitsanwendungen, sondern hat sich auch auf eine Vielzahl von Geschäftsbereichen ausgeweitet, wie z.B. die Automobil- und Luftfahrtindustrie, Unterhaltung, Gaming, Wohlbefinden, Quantified-Self-Anwendungen, aber natürlich neben konventionellen Medizinprodukten auch auf die Bereiche Homecare und Telemedizin.

Um diesen schnell wachsenden Märkten gerecht zu werden, hat Capical ein kapazitives EKG-System entwickelt, das eine berührungslose EKG-Messung durch mehrere Schichten von Materialien wie Kleidung oder ähnlichen Stoffen, Sitzbezügen usw. ermöglicht. Dieses System ist als ein Array von textilen Sensoren konzipiert, so dass es, integriert in einen Sitz oder eine Bettdecke, für den Endverbraucher völlig unauffällig ist. Ein weiteres Hauptvorteil, der sich von technologischen Wettbewerbern wie Wearables, Kamera- und Radarsystemen unterscheidet, besteht darin, dass die Herzfrequenz und die Herzratenvariabilität mit höchstmöglicher Präzision gemessen werden.

Für nahezu alle Endanwenderanwendungen für das berührungslose EKG-System Capicals, sei es ein Auto, LKW oder Flugzeug als Fahrer-/Pilotenüberwachungssystem oder als Patientenüberwachungssystem im Homecare-Einsatz oder in Pflegeeinrichtungen, müssen ähnliche Herausforderungen bewältigt werden. Aus Hardware-Sicht sind dies vor allem die Anforderungen an einen hochspezialisierten und automatisierten Fertigungsprozess, eine langfristige Robustheit der Komponenten in einer stressigen Umgebung, hoher Kostendruck und natürlich der Komfort des Anwenders.

Ein Schwachpunkt aktueller Systeme ist, dass dehnbare Leiterplatten benötigt werden, die größer als Standard-Leiterplattengrößen sind und daher aus Kostengründen nicht anwendbar sind. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von zusätzlichen Anschlüssen oder Klappunkten, die sowohl mechanisch stark beansprucht werden, als auch den Komfort für den Benutzer verringert. Um diese Probleme zu lösen, wird ein Demonstrator implementiert, der TPU-basierte Streifen verwendet, die im Projekt HyPerStripes entwickelt und in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren hergestellt werden.

1.2 Demonstrator: Schlafsensoren

Als Demonstrator wird es sich um eine textile Sensorfolie handeln, die das EKG in einem Bett während des Schlafs misst. Die TPU-Streifen dienen der Kontaktierung der Sensorelektroden und der Verbindung des Sensors mit der Verstärkerbox (ECU). Analoge Bauelemente (Standard SMD) werden in die Streifen in der Nähe der Sensorelektroden integriert und müssen im Rolle-zu-Rolle-Prozess platziert werden. Die Streifen werden mehrmals gefaltet, um sie an die Anforderungen von Rolle-zu-Rolle für lange, dünne Streifen anzupassen. Abhängig vom Ergebnis des Forschungsprojekts wird eine einseitige oder eine doppelseitige Leiterplatte verwendet.

Aufgrund des Anwendungsszenarios benötigt der Streifen selbst eine hohe Flexibilität (höher als bei Standard-Flex-Leiterplatten) in Kombination mit einer begrenzten lokalen Dehnbarkeit, um die Robustheitsanforderungen einer Person zu erfüllen, die auf dem Sensorblatt schläft.

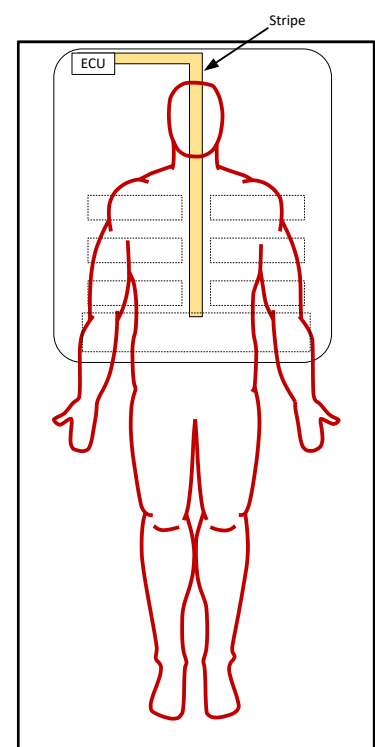


Abbildung 1: Demonstrator Capical

Das Endziel ist eine kostenoptimierte Lösung, bei der die Vorteile des Rolle-zu-Rolle-Verfahrens anstelle der plattenweisen Produktion genutzt werden.

Erfahrungen mit TPU-basierten Leiterplatten wurden mit den Partnern von WP 1 geteilt und sind in die Spezifikationen eingeflossen.

Der Demonstrator wird so konzipiert, dass typische Herausforderungen in verschiedenen Anwendungsbereichen gut abgebildet werden, so dass die Erfahrungen auch auf andere Anwendungsbereiche des kapazitiven EKG-Sensors von Capicals übertragen werden können.

Die folgende Tabelle zeigt die Spezifikationen für den beschriebenen Anwendungsfall. Die Kupferdicke wurde während des Projekts durch die Umstellung vom additiven Verfahren auf das Ätzverfahren geändert.

Spezifikation und Anforderungen an das Material		
Parameter	Wert	Kommentar
Länge	1,5 – 2 m	
Breite	25-40 mm	Je nach 1- oder 2-lagigem Aufbau
Temperaturbereich	10-45 °C	
Feuchtigkeit	10-95%	
Strom	5 mA	max. Strom
Spannung	5 V	
SMD-Gehäuse	0402, SC70, QFN	Kleinere Gehäuse oder NanoWire, falls zutreffend
Oberfläche	ChemNiAu	
Basismaterial	TPU	150-200µ Dicke, 9-18µ Cu, 100µ Leiterbahnen, 0,4mm Löcher
Biokompatibel	Nein	

Tabelle 1: Spezifikation und Anforderungen an den Produktfall

2 Entwurf des HyPerStripes

Der in diesem Projekt entworfene Streifen verbindet die textilen Sensoren des Bettlakens, verstärkt das Signal direkt am Sensor und leitet das Sensorsignal über ein flexibles und dehnbares Kabel zu einer Verstärkerbox an der äußeren Ecke des Lakens. Spezielle Kontaktpunkte im TPU ermöglichen eine direkte Kontaktierung des leitfähigen Textils.

Der entworfene Streifen selbst besteht aus 3 Hauptsegmenten: Kontakt zum Verstärker, Verkabelungssegment sowie Kontaktierung und Vorverstärker.

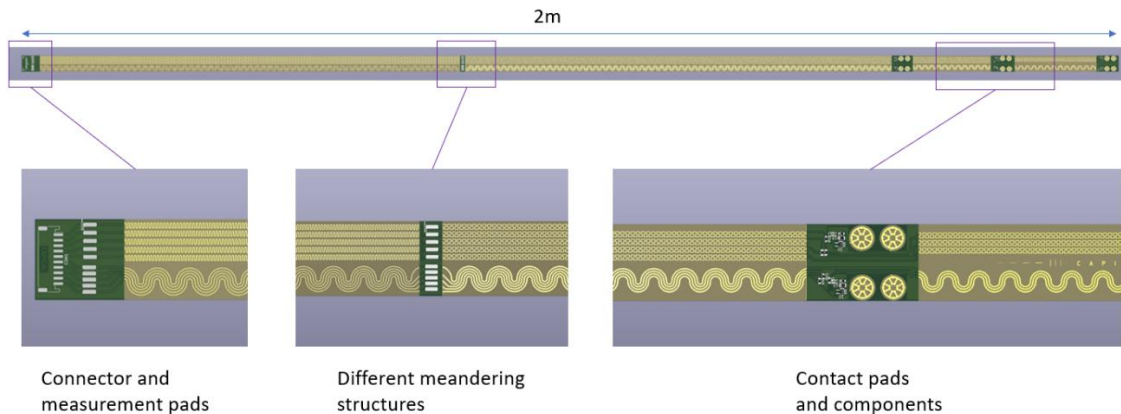


Abbildung 2: Streifen mit verschiedenen Segmenten für Kontaktierung, Verkabelung und Bauteilplatzierung

Für die erste Erprobung des R2R-Prozesses umfasst das Design unterschiedliche Teststrukturen und -muster für die dehnbare Verdrahtung. Die Mäanderform ermöglicht es, das Kupfer im TPU zu dehnen. Es werden zwei Hauptdesignprinzipien verwendet, zum einen das Single Trace Meandering (STM), was bedeutet, dass jede Spur separat mäandert. Das zweite Muster ist ein Multi Trace Meandering (MTM) mit mehreren Spuren. Für jedes Prinzip gibt es zwei getestete Designs. Die vier verschiedenen Segmente haben innerhalb des Streifens die gleiche Länge. Zwischen den Segmenten befinden sich Testpunkte, um den Widerstand jedes Segments zu messen.

	STM	MTM
Ausführung 1		
Ausführung 2		

Tabelle 2: Teststrukturen STM und MTM

Der Prozess zur Herstellung von R2R-Streifen auf TPU-Substrat ist beim Projektpartner (Fraunhofer EMFT) noch nicht etabliert. Um das Design auf TPU-Basis zu testen, wurde ein spezielles Testblatt basierend auf den oben beschriebenen Designmustern entworfen. Damit ist die Fraunhofer EMFT in der Lage, den TPU-Produktionsprozess auf Blechebene ohne R2R zu testen. Das TPU-Material wurde von Wuerth zur Verfügung gestellt. Das Testblatt hat eine Abmessung von 20x10 cm und enthält alle unterschiedlichen Strukturen aus dem Streifendesign.

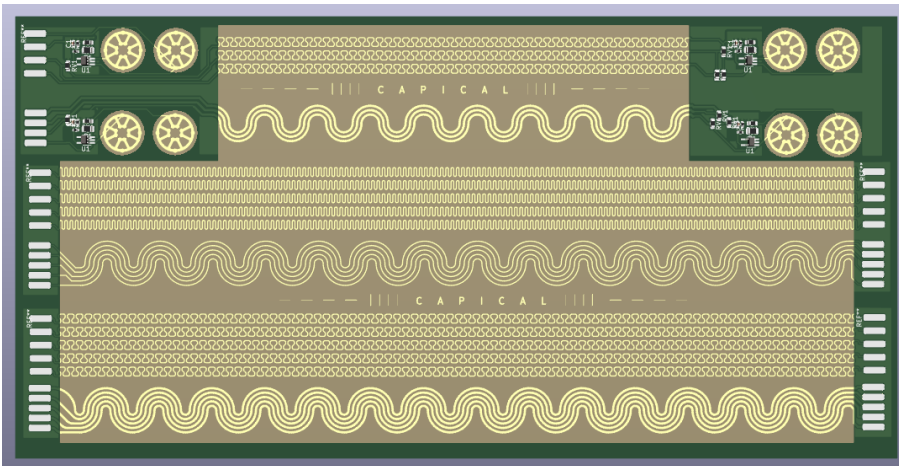


Abbildung 3: Teststruktur basierend auf dem Streifendesign für die Produktionsprüfung von TPU-Platten

Basierend auf dem bestehenden Verfahren muss das Design aufgrund der begrenzten Größe der Lithografiemaschine bei Fraunhofer in verschiedene Segmente unterteilt werden. Die verschiedenen Segmente werden dann in einem sequenziellen Prozess zusammengesetzt (sogenanntes Stitching), um den vollen 2 m langen Streifen zu erhalten. Um diesen Prozess zu testen, wurden die verschiedenen Segmente für einen ersten Test bei Fraunhofer vorbereitet. Das Design wurde in drei Segmente (Kontakt-, Mäander- und Montagebereich) unterteilt, die beliebig oft wiederholt werden können, basierend auf universellen Endpunkten an jedem Segment.

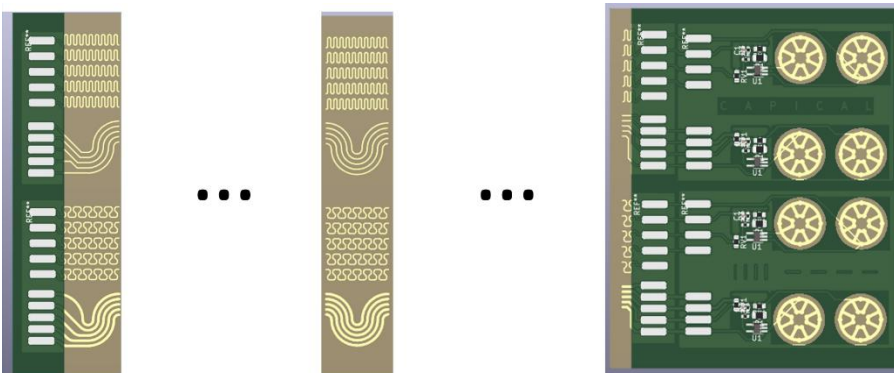


Abbildung 4: Ausführung der Nähte

Um die Textilkontaktierung zu testen, wurden verschiedene Prüfstrukturen mit dem Laserschneider hergestellt.



Abbildung 5: Prüfstruktur für leitfähiges Textil gelasert

3 Herstellung der HyPerStripes

3.1 Prüfmuster

In einem ersten Schritt wurde von der Fraunhofer EMFT ein 1m langes Testmuster in einem additiven Verfahren unter Verwendung von Kupferabscheidung auf dem TPU hergestellt, gefolgt von Strukturierung und Ätzung. Diese Proben wurden dann bei Capical charakterisiert.



Abbildung 6: Testmuster mit unterschiedlichen mäandernden Strukturen

Es gab 4 verschiedene mäandernde Strukturen, die A-D genannt wurden. Der Widerstand wurde an Kontaktpunkten am Anfang und Ende jeder Struktur gemessen. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen an. Die Ausfallrate war recht hoch und der spezifische Widerstand variierte von 13Ω bis fast 100Ω was aufgrund der unterschiedlichen Mustergeometrie und -länge zu erwarten war.

	1		Resistance(Ohm)		2		Resistance(Ohm)		
A		A	1	68.2		A	1	62.3	100% OK
			2	86.7			2	62.6	
			3	71.5			3	61.8	
			4	83.1			4	61.8	
			5	98.1			5	81.2	
B		B	1	x		B	1	x	10% OK
			2	x			2	68.6	
			3	x			3	x	
			4	x			4	x	
			5	x			5	x	
C		C	1	67.7		C	1	x	70% OK
			2	54.6			2	74.6	
			3	x			3	72.2	
			4	x			4	55.4	
			5	59.1			5	54.3	
D		D	1	13.2		D	1	x	60% OK
			2	x			2	16.1	
			3	x			3	15.9	
			4	x			4	13.5	
			5	13.2			5	13.3	

50% OK 70% OK

Abbildung 7: Ergebnisse der Widerstandsmessung

Hauptgründe für die hohe Ausfallrate waren Risse in den Kupferstrukturen, wie in Abbildung 8 verdeutlicht sind. Hauptgründe für diese Risse waren Haftungsprobleme zwischen TPU und Kupfer sowie Probleme mit der Handhabung im Walzprozess. Nach der Messung des spezifischen Widerstands wurden Dehnversuche durchgeführt, die jedoch bereits bei minimaler Dehnung zu einem sofortigen Versagen der Leiterbahnen führten. Die Kupferdicke war zu gering, um den Dehnungskräften im Inneren des TPU standzuhalten.

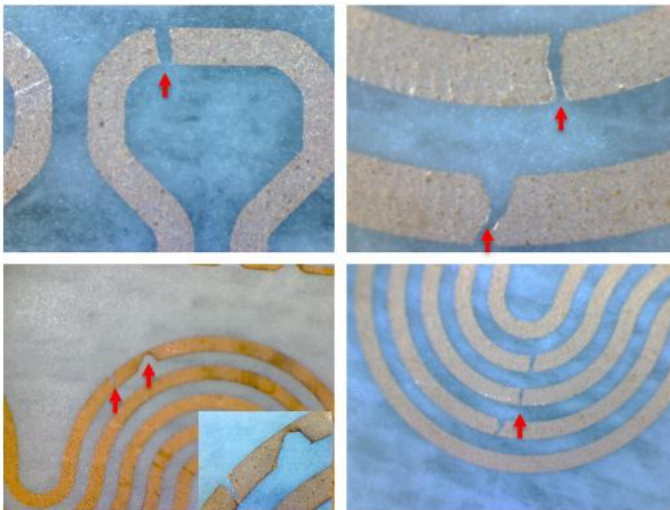


Abbildung 8: Rissige Kupferspuren

Positiv zu vermerken ist, dass die Haftung zwischen dem Kupfer und dem TPU in den meisten Bereichen gut war und die Auflösung des Strukturierungsprozesses für die von Capical benötigten Strukturen mehr als ausreichend war (Abbildung 9).

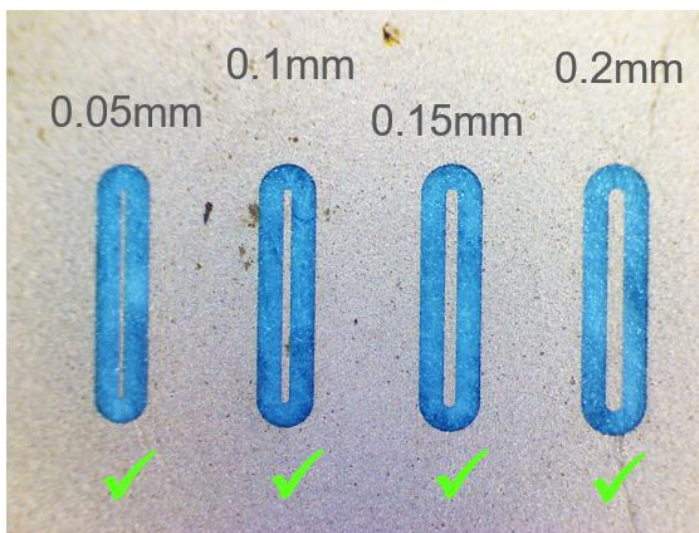


Abbildung 9: Teststruktur zur Prozessauflösung.

3.2 Demonstrator

Basierend auf den Ergebnissen mit der Teststruktur hat die Fraunhofer EMFT das Verfahren geändert und verwendet laminiertes Kupfer auf TPU mit einer dickeren Kupferschicht, um die Ausfallrate zu reduzieren und die Dehnbarkeit zu erhöhen. Das Design für den Demonstrator wurde von Capical erstellt. Sich wiederholende Muster wurden von der Fraunhofer EMFT in ihren Prozess übertragen, so dass die Länge des Streifens ca. 1,5m beträgt.

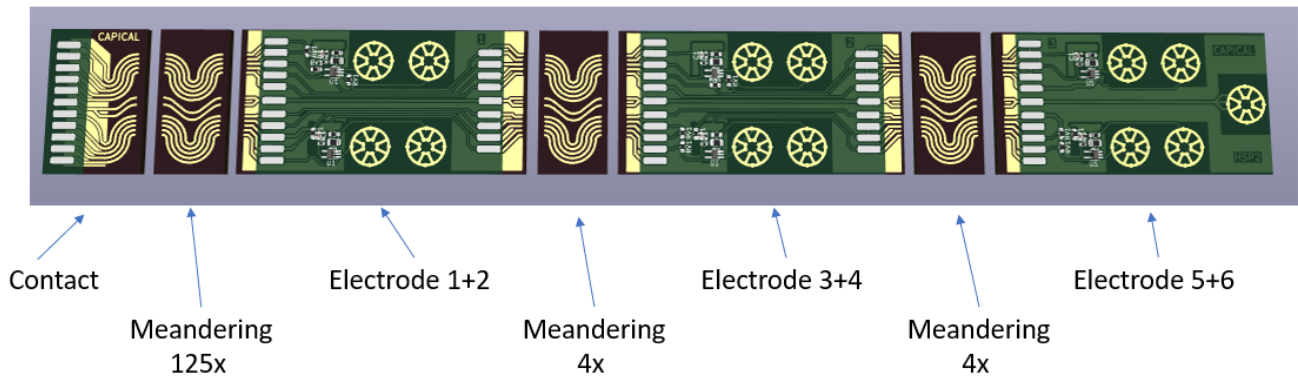


Abbildung 10: Design des TPU-Hyperstripes für den Capical Demonstrator

Für den Demonstrator wurde aufgrund des geringen Widerstands die mäandernde Struktur D verwendet. Aufgrund des dickeren Kupfers betrug der Widerstand der Demonstratorstruktur $10\ \Omega$ und damit niedriger als der der Teststruktur, obwohl die Länge des Streifens größer war.

3.3 Montage und Integration

Die Streifen wurden mit dem vorbereiteten textilen Sensorbogen in Kontakt gebracht. Die Komponenten wurden aufgrund des niedrigen Schmelzpunkts des TPU mit einem Niedertemperaturlot gelötet.

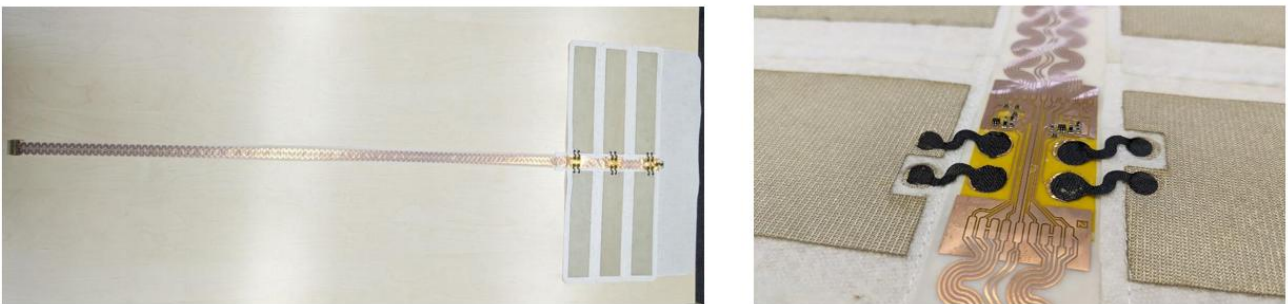
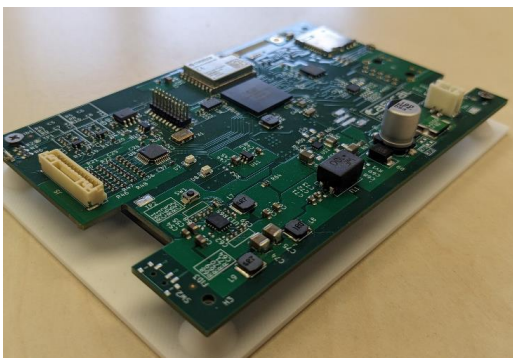


Abbildung 11: Zusammengesetztes Blech mit Textilelektroden. Die Länge des Hyperstreifens beträgt 150cm.

Im Moment enthält der Streifen kein ENIG, keine Deckschicht und keine Lötmaske. Eine Dehnung des Streifens war im erwarteten Bereich ohne Ausfall möglich.

Das Steuergerät für den Demonstrator wurde mit 6 Eingangskanälen gebaut. Das Steuergerät ist in einem Aluminiumgehäuse gesichert.



Hauptmerkmale:

- EKG-Signalverarbeitung
- Daten-Streaming
- SD-Karte Aufnahme
- BLE-Schnittstelle (Android-App)
- Live-Daten-Streaming für die Demo-Einrichtung

Abbildung 12: Steuergerät mit den wichtigsten Spezifikationen

Um das Steuergerät zu steuern und die Daten des Sensors anzuzeigen, wurde eine Android-App programmiert, die auf einem Tablet-Gerät ausgeführt wird. Die App ist in der Lage, Live-Daten zu streamen, Herzfrequenz und Atemfrequenz abzuleiten und mit mehreren Sensoren zu kommunizieren.

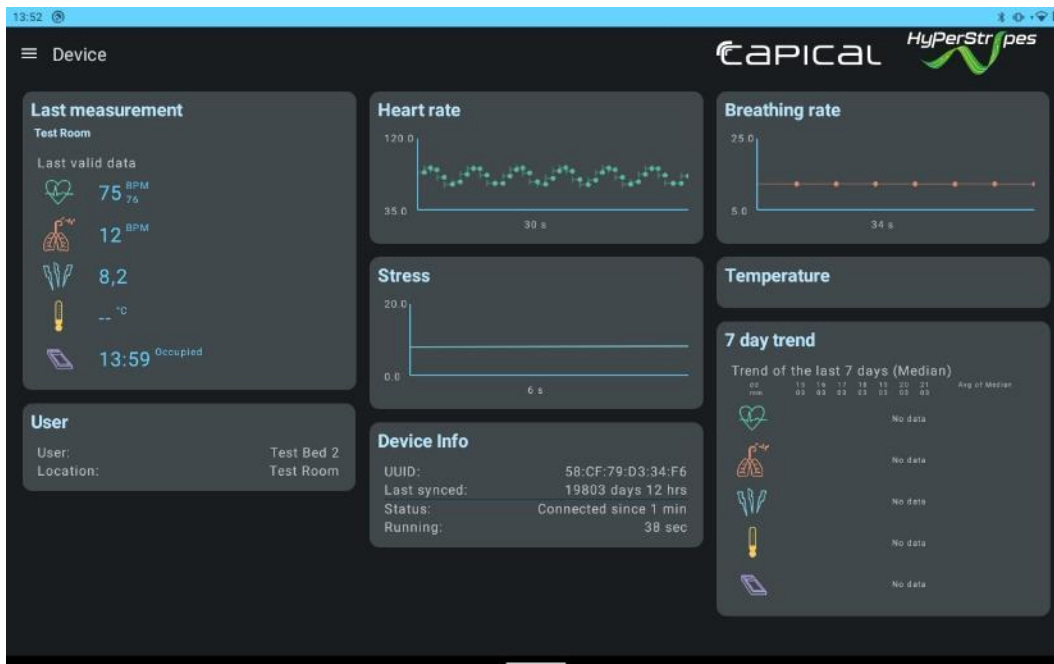


Abbildung 13: Android-App für den Demonstrator

4 Assemblierung

4.1 Aktualisierung von Design, Fertigung und Montage

Es wurden keine relevanten Änderungen am Design vorgenommen. Für die Herstellung evaluierte die Fraunhofer EMFT einen Abdeckprozess, bei dem ein dünner, transparenter und flexibler Lackfilm manuell auf die TPU-Streifen aufgebracht wurde. Eine Maskenebene wurde bereitgestellt, um die Bereiche für den Lack zu definieren. Dieser Lack fungiert als Deckschicht, da bei EMFT derzeit kein R2R-Kaschierungsverfahren verfügbar ist.

4.2 Design und Fertigung

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt den zuvor hergestellten TPU-Streifen mit der flexiblen Deckschicht (unterer Streifen) im Vergleich zum unbedeckten Streifen (oberer).

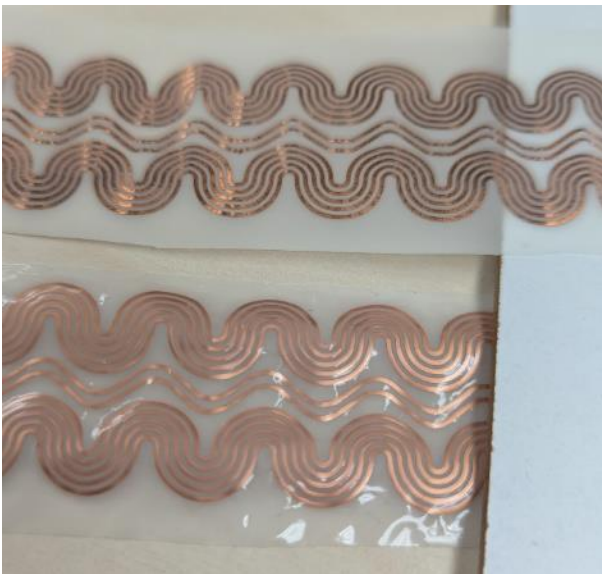


Abbildung 14: TPU ohne (obere) und mit (unterer) Deckschicht

Die Folie verformt den Streifen und führt zu einem Roll-on-Effekt in Querrichtung. Aber es scheint gut vor Korrosion zu schützen und die Flexibilität und Dehnbarkeit ist so gut wie bei TPU. Obwohl es für das Endprodukt notwendig ist, wurde die Beschichtung aufgrund des manuellen Prozesses nicht im Schaltungsbereich aufgebracht. Eine Maskierung dieser kleinen Strukturen (kleinste Bauteile sind 0402 und SC70 Packungen) war nicht möglich. Außerdem war eine ENIG-Beschichtung bei EMFT nicht verfügbar.

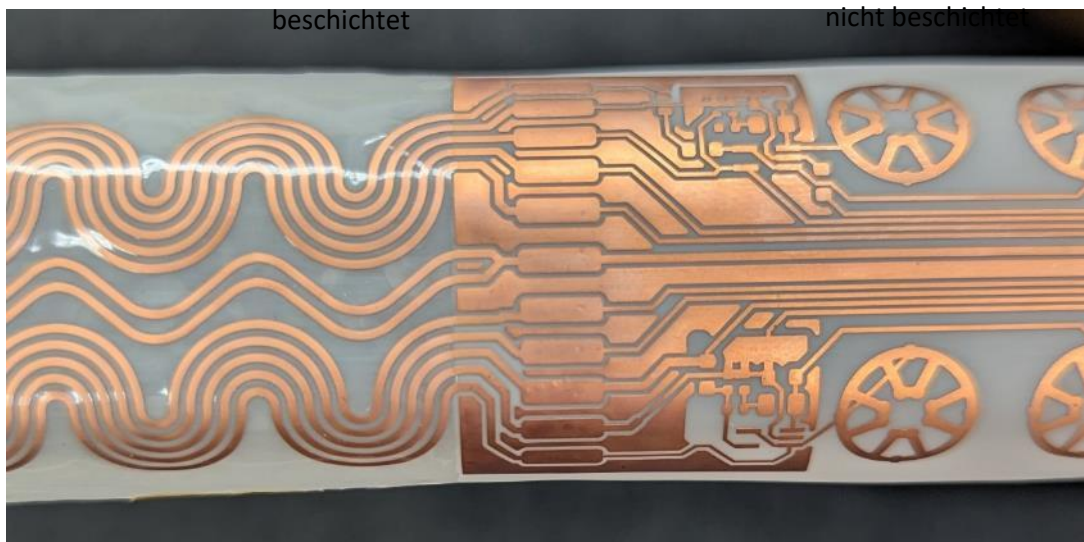


Abbildung 15: Beschichtungsbereiche

4.3 Endmontage

Ein vollständiges Sensorblatt wurde für kontinuierliche Messungen zusammengestellt. Alle Bereiche wurden so abgedeckt, dass das Bezugstextil nach der Prüfung zur Inspektion abgenommen werden kann.



Abbildung 16: Sensorblatt mit TPU HyPerStripe

4.4 Tests und Evaluierung

4.4.1 Testbeschreibung/-definition

Es wurden zwei Haupttests durchgeführt, zum einen die Messung der Flexibilität und Leitfähigkeit und zum anderen die Funktionstests in realen Umgebungen bei Capical und beim Kunden vor Ort.

Für die mechanische Prüfung wurde ein Segment des Streifens zwischen zwei Stäben fixiert und über eine festgelegte Anzahl von Zyklen um 10 % gedehnt.

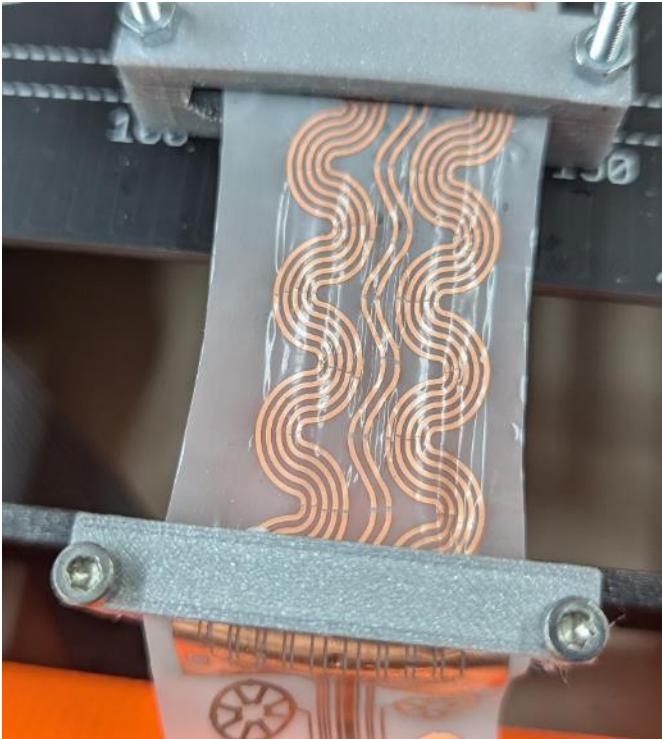


Abbildung 17: Fixierter HyPerStripe im Versuchsaufbau am Ende der mechanischen Prüfung

Nach jedem Lauf wurde die Leitfähigkeit zwischen den Leiterbahnen gemessen.

4.4.2 Testergebnisse

Dehnungstest:

Das Dehnen begann mit 100 Takten bis 500 Takten und setzte sich mit 500 Takten/Schritt bis 2000 Takten fort. Die max. Dehnungslänge betrug 110 %. Nach jedem Zyklus wurden die Spuren gemessen. Leiterbahnen hatten entweder eine geringe Leitfähigkeit ($<1\Omega$) oder keine Leitfähigkeit, so dass der Wert der Leitfähigkeit nicht genannt wird, sondern nur die Anzahl der unterbrochenen Leiterbahnen.

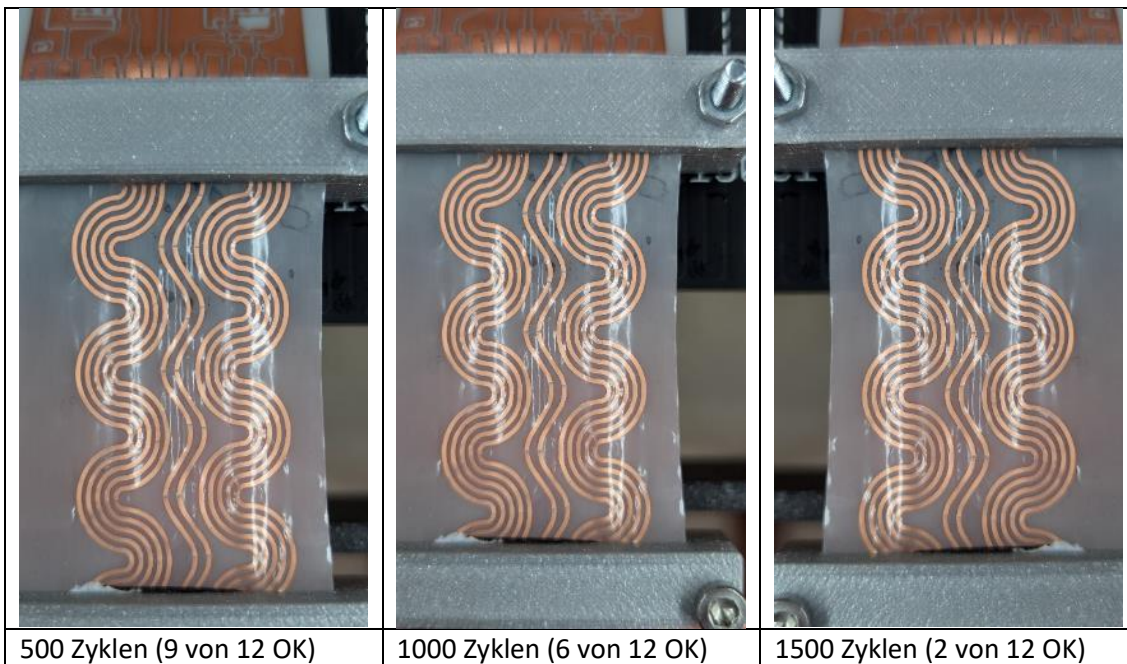


Abbildung 18: Testergebnisse

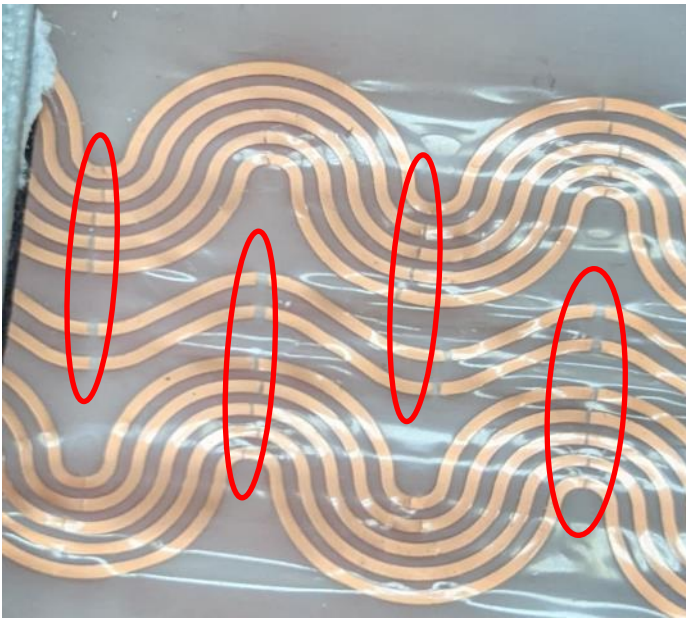


Abbildung 19: Nach 2000 Dehnungszyklen waren alle Spuren gebrochen.

Die Dehnungsergebnisse lagen im erwarteten Bereich. Zuerst wurden die Bereiche mit kleinerem Kurvenradius zerstört (Leiterbahnen in der Mitte des Streifens). Danach brach zuerst der innere Radius und zuletzt die mittleren Leiterbahnen, da sie den höchsten minimalen Radius im gemessenen Bereich hatten.

Einer der Streifen war in ein Schlafsensor integriert und wurde für die kontinuierliche Überwachung über mehrere Nächte hinweg verwendet. Abbildung 20 bis Abbildung 22 zeigen die Beat-to-Beat-Intervalle, den Stressindex und die Rohbeat-Daten einer dieser Messungen. Die Daten haben die gleiche Qualität wie die zuvor aufgezeichneten Daten des Produkts ohne HyPerStripes.

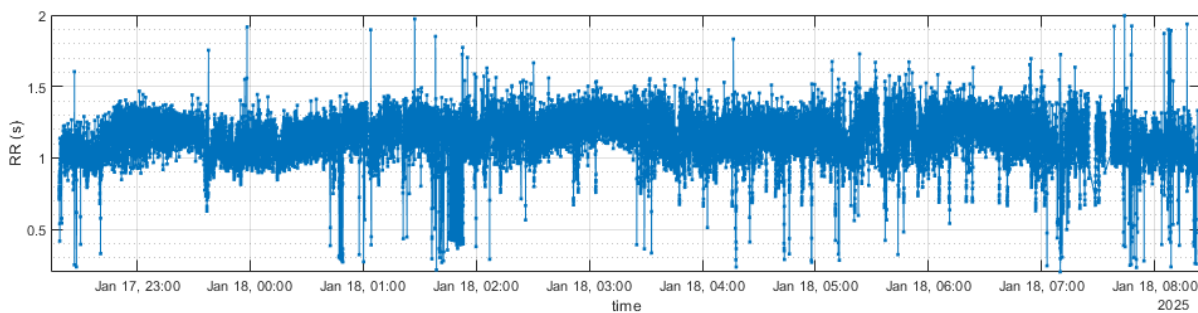


Abbildung 20: Schlag-zu-Schlag-Intervalle eines Probanden, der auf einem Sensorblatt mit HyPerStripes schläft

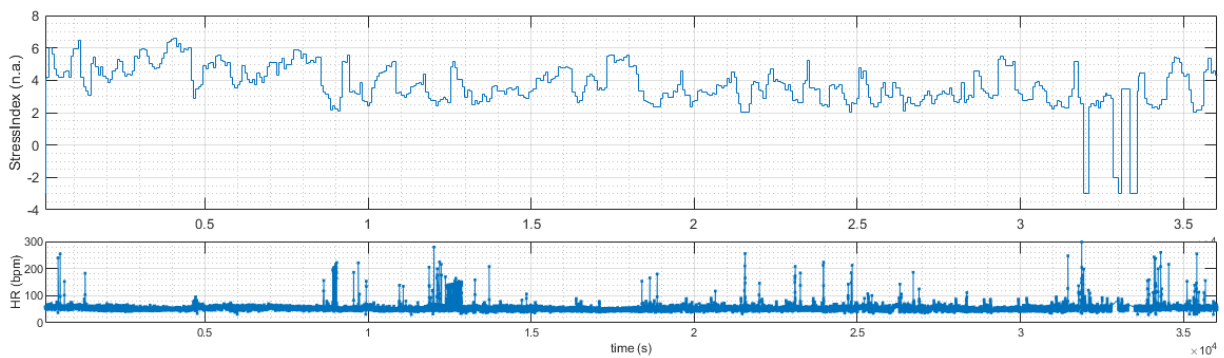


Abbildung 21: Stressindex abgeleitet aus der Herzfrequenzvariabilität (HRV) während der Nacht

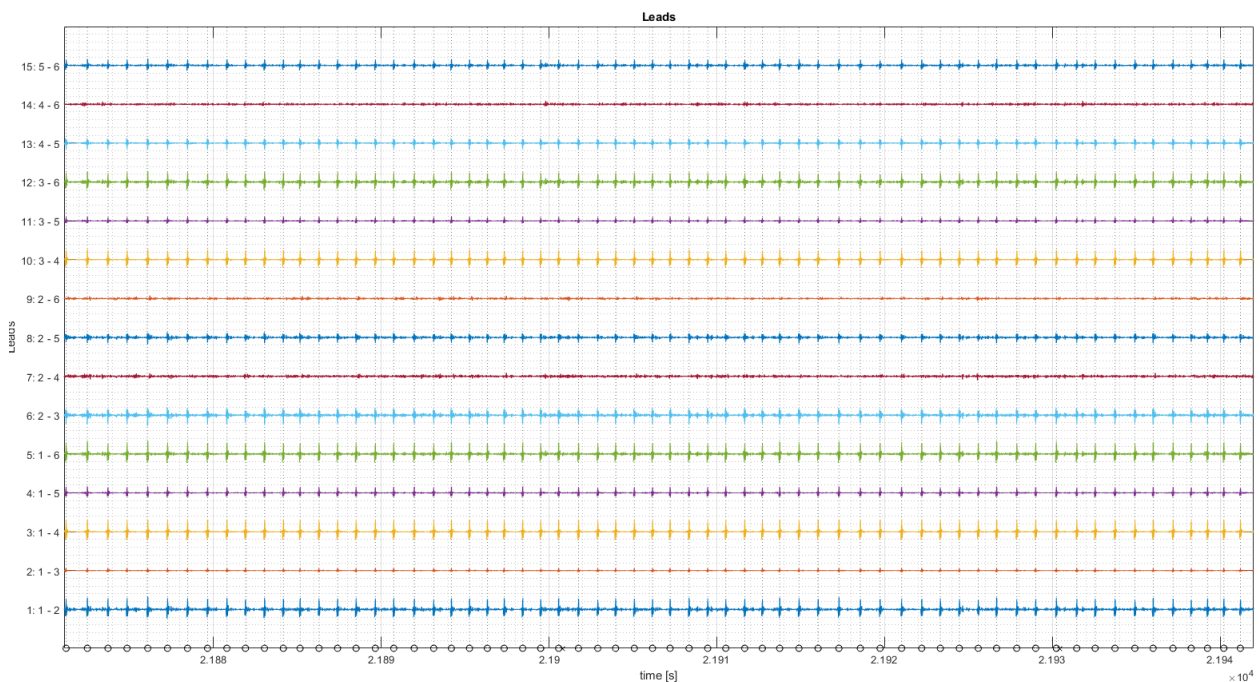


Abbildung 22: Schmalbandiges gefiltertes EKG von allen Ableitungen, berechnet aus den 6 Elektroden mit perfekter Signalqualität

Nach 5 Nächten wurde das Blatt auf Spurenebene überprüft. Es gab einige Schäden im Schaltungsbereich aufgrund von nicht optimalen Spurmäandern in den Bereichen, die mit Kaptonband unter dem TPU versteift waren. Obwohl der Bereich versteift war, führte das Biegen des Blechs während der Nacht zu einer Spurenverschiebung. Dies könnte leicht behoben werden. In den mäandrierenden Abschnitten gab es keine Schäden.

5 Zusammenfassung

5.1 Bewertung der Projektarbeiten

Die Ausgaben im Projekt entfielen nahezu vollständig auf Personalkosten. Investitionen waren nicht erforderlich. Die benötigten HyPerStripes-Komponenten wurden von den beteiligten Projektpartnern bereitgestellt, sodass hierfür keine zusätzlichen Kosten anfielen. Zudem konnte auf vorhandene Unternehmensressourcen in Form von Hardware und Softwarelizenzen zurückgegriffen werden, wodurch das Projekt effizient und ohne Mehraufwand umgesetzt werden konnte.

Alle durchgeführten Arbeiten standen in direktem Zusammenhang mit den Projektzielen und waren sowohl inhaltlich als auch wirtschaftlich erforderlich, um die intendierten Ergebnisse zu erreichen. Bei der Planung und Umsetzung wurde durchgehend darauf geachtet, dass die eingesetzten Ressourcen effizient verwendet wurden und die Arbeiten in Umfang, Tiefe und Methodik stets verhältnismäßig sowie zielführend ausgerichtet waren. Die Notwendigkeit ergab sich aus dem hohen Innovationsgrad und der praktischen Relevanz der entwickelten Ansätze.

Durch die Ergebnisse des Hyperstripes-Projekts konnte gezeigt werden, dass eine lange Kontaktierung mittels TPU-Streifen eine valide Option darstellt, die Verkabelung im Sensorsheet deutlich zu verbessern. Auch wenn eine vollständige Integration aller Komponenten kurzfristig aus Kostensicht nicht sinnvoll erscheint, ermöglicht ein hybrider Aufbau mit langem TPU-Streifen und Standard-Flex insbesondere eine Verbesserung der Robustheit des Sensors. Dies wirkt sich positiv auf Lebensdauer und Komfort aus.

Im Hinblick auf die Weiterentwicklung des Sensors als Consumable kann die Trennung von Sensorbereich und TPU-Zuleitung zusätzlich das Recycling vereinfachen. Damit ergeben sich klare Perspektiven für eine industrielle Nutzung und Weiterentwicklung.

Im Laufe des Projekts wurden keine nennenswerten Fortschritte auf dem Gebiet der R2R-TPU-Streifen an anderer Stelle registriert. Durch zahlreiche Gespräche innerhalb und außerhalb des Konsortiums konnte festgestellt werden, dass es sich um eine neuartige Verfahrensweise zur Herstellung von TPU-Streifen handelt.

Seitens Capical sind keine weiteren Veröffentlichungen der Ergebnisse geplant.

5.2 Fazit

Insgesamt waren die HyPerStripes geeignet, um das Problem der langen Verkabelung des Sensorsheets zu lösen. Dennoch bieten die fehlende Deckschicht und ENIG-Beschichtung nicht die gleiche Langzeitstabilität im Vergleich zu TPU-Streifen, die mit dem Standard-PCB-Verfahren (nicht R2R) hergestellt wurden. Aber die Länge des Streifens und die Reduzierung der Verbindungen innerhalb des Sensorsheets zeigten für diese Anwendung bereits eine große Verbesserung. Die HyPerStripes können z.B. nur für den langen Verkabelungsbereich verwendet werden und dann mit Standard-Flex kombiniert werden. Das könnte eine Option sein, um die Notwendigkeit einer ENIG-Beschichtung des TPU zu vermeiden und einfache Deckschichttechniken zu verwenden, wie die Folie in diesem Projekt gezeigt wurde. Aufgrund der dehnbaren Natur des TPU scheint ein R2R-Deckschichtlaminierungsprozess mit der gewünschten Präzision schwieriger zu sein, als ursprünglich zu Beginn des Projekts angenommen.

5.3 Roadmap zu zukünftigen Produkten

Das HyPerStripes-Projekt zeigte die Machbarkeit von langen R2R-Streifen, die eher für den Ersatz der In-Sheet-Verkabelung als für den Komponentenbereich geeignet sind, aber dennoch einen großen Vorteil für das Produkt darstellen. Der nächste Schritt der Produktentwicklung ist die Kombination von TPU mit Standard-Flex-Leiterplatten, um das Beste aus beiden Welten herauszuholen. Die Standard-Flex-Leiterplatte kann weiterhin im Panel-PCB-Prozess hergestellt werden, während TPU in R2R die Möglichkeit bietet, den vorhandenen und hochbeanspruchten Flex-Bereich im Verkabelungsbereich zu ersetzen. Dies soll zu einer längeren Lebensdauer des Produkts führen, was auch die Nachhaltigkeit erhöht. Die Kostenseite war immer noch nicht beantwortet,

da der R2R-Prozess des TPU in diesem Projekt eher ein Proof-of-Concept als ein seriennaher Prozess war. Auf der Prozessseite müssen weitere Optimierungen vorgenommen werden.