

Abschlussbericht zu 16ME0338S



Verbundprojekt

Additive Manufacturing-based Production of Robust Embedded Electronics - AMPERE

Im Rahmen des Förderprogramms

PENTA Call 5

Teilvorhaben

Entwicklung einer Anlage für automatisierte additive 4D-Druckverfahren für Mikrosysteme (ADD-4D)

Zuwendungsempfänger	XENON Automatisierungstechnik GmbH Pforzheimer Str. 16 01189 Dresden		
Förderkennzeichen	16ME0338S		
Laufzeit des Vorhabens	01.04.2021	bis	31.07.2024
Projektleiter	Dr. Sylvia Horn (techn.)	Dr. Jens Müller (admin.)	

Ort / Datum

Dr. Jens Müller
(Projektmanager Innovation)

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis	2
Teil I: Kurzbericht zu 16ME0338S.....	3
1. Ursprüngliche Aufgabenstellung	3
2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	3
3. Ablauf des Vorhabens.....	7
4. Wesentliche Ergebnisse	8
Leistungsumfang Maschinendemonstrator XENON.....	8
5. Zusammenarbeit.....	8
Projekttreffen	8
Zusammenarbeit im Projekt mit folgenden Projektpartnern	9
Teil II: Ausführliche Darstellung der Projektergebnisse zu 16ME0338S	10
1. Ergebnisse.....	10
Auswahl Leitleber	10
Auswahl Dosiersystem	11
Prozessentwicklung Dosieren.....	11
Oberflächenvermessung	14
Maschinendemonstrator.....	16
Generierung von NC-Code.....	19
Inbetriebnahme Maschinendemonstrator.....	19
Pick and Place Prozess der LEDs.....	20
Herstellung Luminaire-Proben	21
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	22
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	22
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Projektergebnisse.....	22
5. Während der Projektlaufzeit bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	24
6. Veröffentlichungen.....	24

Teil I: Kurzbericht zu 16ME0338S

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Ziel des Teilvorhabens von XENON war es, eine prototypische Anlage für hochpräzise Druckprozesse von elektrischen Leiterbahnen auf mittels additiven Verfahren hergestellten 2D- und 3D-Oberflächen mit integrierter Möglichkeit zur Bestückung mit Elektronikkomponenten zu entwickeln, aufzubauen und zu testen. Im Einzelnen waren

- Anlagenkonzepte zu entwickeln und im Hinblick auf erreichbare Parameter, Umsetzungsaufwand sowie Modularisierbarkeit zu analysieren, zu bewerten und zu optimieren,
- mechanische Baugruppen der Demonstratoranlage für Werkstückhandhabung, Tinten- und/oder Pastendispensen, Druckkopfbewegung, Bestückung, anlagenintegrierte Charakterisierung und weitere mechanische Funktionen zu entwickeln
- die Steuerung der Demonstratoranlage einschließlich Steuerungs-Software zu entwickeln
- die Demonstratoranlage aufzubauen und in Betrieb zu nehmen

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Dispensen

Für das **Drucken von Leiterbahnen** ist der Einsatz von präziser und für den Dauereinsatz geeigneter Dispenstechnik notwendig, da die verwendeten pastösen Materialien hohe Ansprüche an das Equipment stellen. Abbildung 1 zeigt eine Auflistung von prinzipiellen Verfahren für das Dispensen von Medien. In Abbildung 2 ist der Unterschied zwischen berührenden und berührungslosen Dosierverfahren dargestellt.

Berührungslose Verfahren haben den Vorteil des Ausgleichs von Dickenschwankungen des Substrates. Technisch bedingt ist dieses Verfahren jedoch besser für Nanopartikel-Tinten mit geringer Viskosität geeignet. Nachteil ist zudem der deutlich höhere Preis in der Anschaffung sowie eine komplexere Mechanik mit höherem Wartungsaufwand gegenüber berührenden Dispenssystemen.

Für das Dispensen von gefüllten Leitpasten und -Klebstoffen sind berührende Verfahren (z.B. druckbeauschlagte Extrudierverfahren, oder Schraubenextruder) besser geeignet (s Abbildung 3), da diese Systeme auch Materialien mit höherer Viskosität verarbeiten können.

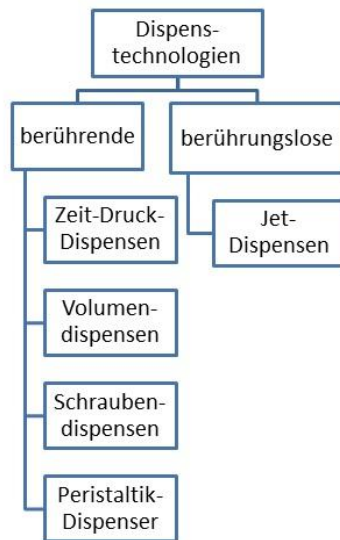


Abbildung 1 Dispenstechnologien

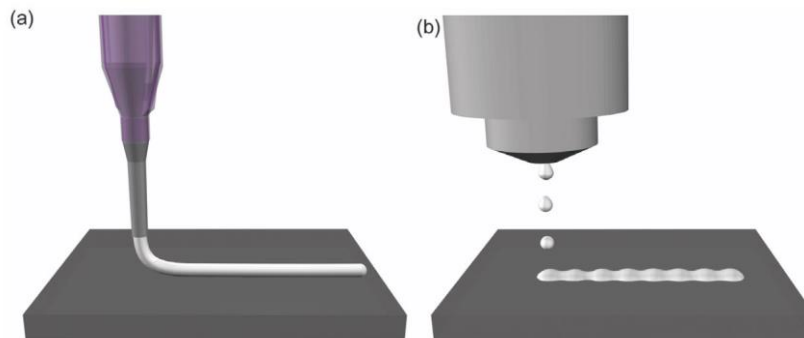


Abbildung 2 a) Kontaktdispensen (berührend); b) Jet Dispensen (berührungslos)

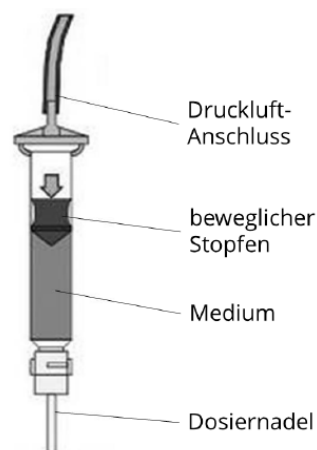


Abbildung 3 Druckbeaufschlagtes Extrudiersystem mit Dosiernadel

Handling-Systeme

Handhabe- oder Pick&Place-Vorgänge sind meist Hilfsarbeitsgänge, die sich an technologische Prozesse anschließen und damit die Gesamt-Taktzeit verlängern. Im weiteren Sinne enthält die Handhabung die Aufgaben „Zuführung von Werkstücken und Hilfsstoffen zum Prozessschritt. Die räumliche Anordnung wird durch Manipulatoren (Handlings, Roboter) verändert. Für die Handhabung

von Bauteilen werden üblicherweise Systeme mit unterschiedlichen Kinematiken verwendet. Als Tripod oder als Hexapod ausgeführte Systeme unterscheiden sich unter anderem in den Freiheitsgraden der Greiferpositionierung (Abbildung 4). Ihr Hauptvorteil besteht darin, dass alle Antriebsmotoren ortsfest sind, so dass nur sehr wenig Masse beschleunigt werden muss und sehr hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten erreicht werden können. Andererseits nehmen diese Kinematiken einen sehr großen Bauraum ein und sind auf verhältnismäßig geringe transportierte Massen beschränkt, was wiederum den Einsatz bestimmter Greiftechnologien einschränkt.

Für die Positionierung der Dispensapplikation und dem Handhaben von elektronischen Komponenten existieren unterschiedliche Lösungswege. Die Verwendung eines 6-Achs-Roboterarms ist im Prinzip immer möglich, erweist sich aber aufgrund der hohen Dynamik des Systems bei schnellen Dispensvorgängen und der komplexen Ansteuerung einer Vielzahl von Motoren und Reglern unter bestimmten Bedingungen als zu langsam, so dass es bei Dispensvorgängen über Ecken, bzw. kleine Radien, ohne aufwändige Steuerung des Dispensvolumens in der Regel zu unerwünschten Materialanhäufungen kommt. Zusätzlich ist diese Lösungsvariante sehr kostenintensiv und steuerungsaufwändig.

Eine Möglichkeit den gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden, besteht in der Positionierung durch schnelle und hochgenaue kartesische X-Y-Z-Portalachssysteme (Abbildung 4). Durch die im Vergleich zu einem 6-Achs-Roboterarm geringere Anzahl an zu steuernden Achsen und dem prinzipiell anders realisierten Bewegungsablauf erlauben Systeme dieser Art deutlich höhere Beschleunigungen bei gleichbleibender Prozessgenauigkeit.

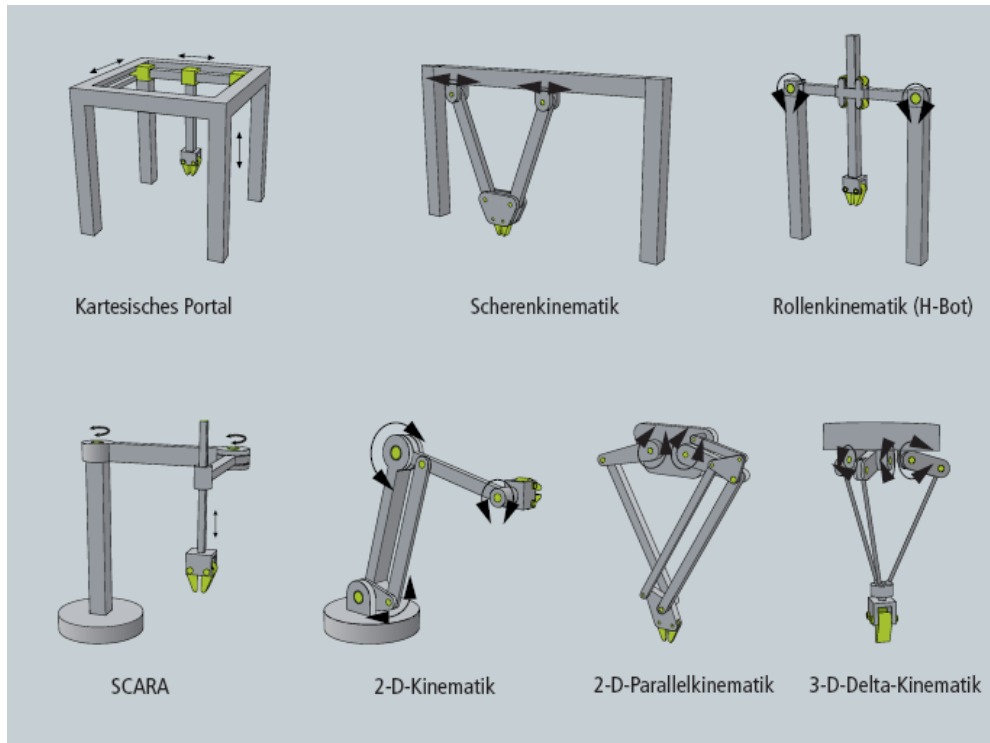


Abbildung 4 Übersicht typischer Manipulator-Kinematiken in Handhabungssystemen

Messtechnik

Auf dem Markt konkurrieren derzeit mechanisch taktile mit berührungslosen Messgeräten, wobei der Anteil optischer Messsysteme stetig zunimmt. Sowohl taktile als auch optische Verfahren haben ihre Relevanz zur Sicherung der Fertigungsqualität und sind ein wichtiger Kostenfaktor in der Produktion. Obwohl die Auflösung der optischen Messverfahren meist den Anforderungen der Charakterisierung von Mikrostrukturen theoretisch genügt, sind nur wenige Verfahren robust gegenüber lokal wechselnden Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften. Erhöhte Anforderungen im Einsatz optischer Mikromessverfahren sind das Senken von Messzeiten, Erreichen der Messauflösung im Verhältnis zum Messbereich und optimaler Messbedingungen. Von Bedeutung im Projekt ist die zuverlässige Messung auf unterschiedlichen Materialoberflächen und unterschiedlichen Oberflächenstrukturen bei minimalen Mess- und Positionieraufwand.

Bei optisch glatten Oberflächen hängt die Detektierbarkeit von der numerischen Apertur der Messoptik ab. Aufwändige Lösungsansätze zur Vermessung steiler Flanken sind die systematische Verkipfung des Messobjektes oder der Einsatz einzeln ansteuerbarer Spiegelarray zur Beleuchtungsanpassung.

Bei optisch rauer Oberfläche wird das einfallende Messlicht als Streukeule reflektiert, so dass stark geneigte Flanken an Geometrien noch messbar sind. Abbildung 5 zeigt einen Überblick über etablierte Messverfahren und kommerziell verfügbare 3D-Messsysteme im Stand der Technik. Alle Verfahren zielen auf die möglichst genaue Abbildung der Topographie und Geometrie einer Messfläche ab. Die Messwerte werden punktwise (z.B. Autofokusverfahren, konfokales Laserscanning), linienhaft (z.B. Tastschnittverfahren) oder flächenhaft über einen CCD-Chip aufgenommen (z.B. Weißlichtinterferometrie, Streifenprojektion). Die gewonnenen Punktwolken werden zu Profilen oder Flächen verknüpft und mit Regelgeometrien verglichen.

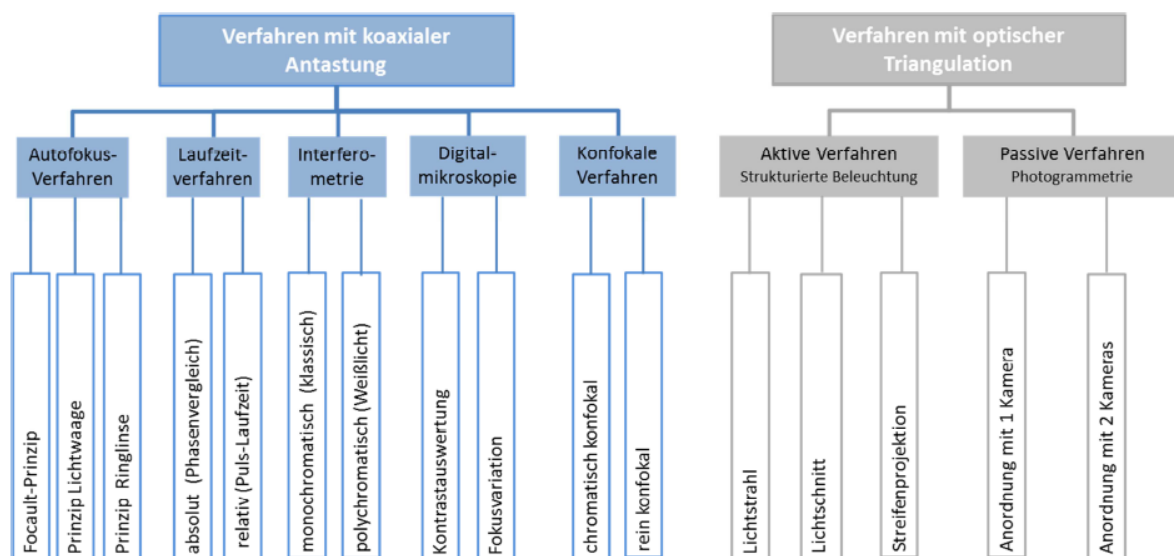


Abbildung 5 Übersicht zu etablierten optischen 3D-Messtechniken

3. Ablauf des Vorhabens

		Month																																																										
		2021								2022								2023								2024																																		
Work Package		A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D														
1	Product Specifications																																																											
T1.1	Identification of product specifications																																																											
T1.2	Materials/technologies/measurement																																																											
T1.3	Scalable production process concepts																																																											
2	Technology Development																																																											
T2.1	Develop/integrate essential technologies																																																											
T2.2	Ensure robust/reliable manufacture																																																											
T2.3	Develop/test system architectures																																																											
T2.4	Cost model development																																																											
T2.5	Integration of technologies.																																																											
3	Materials Development																																																											
T3.1	Materials concepts																																																											
T3.2	Development of (composite) materials																																																											
T3.3	Testing of AM processability																																																											
T3.4	Material property testing																																																											
4	Design Tool Development																																																											
T4.1	Relationship model																																																											
T4.2	Rapid simulation development																																																											
T4.3	EMC Shielding simulation development																																																											
T4.4	Generic Design Tool Development.																																																											
5	Product Demonstrators																																																											
T5.1	Manufacturing system demos																																																											
T5.2	Product architectures																																																											
T5.3	Product prototypes																																																											
T5.4	Verification and validation																																																											
6	Innovation management																																																											
T6.1	Dissemination/communication activities																																																											
T6.2	Exploitation of the project results																																																											
T6.3	Intellectual property																																																											
T6.4	Product life cycle analysis																																																											
T6.5	Business model and use case scenarios																																																											
7	Project management																																																											
Milestones																																																												

Abbildung 6 Ablaufplan für AMPERE 16ME0338S

Arbeits-/Zeitplanung:

Projektergebnisse: Die im Projekt angestrebten Ergebnisse konnten in vollem Umfang erreicht werden.

Zeitplanung: Bei nahezu allen im Projekt beteiligten Partnern im Bereich der Entwicklung von Fertigungstechnologien (Neotech AMT, XENON, Holst Centre / TNO), kam es bedingt durch die Einschränkungen während der Corona-Pandemie und anhaltender Lieferverzögerungen bei Zulieferern zu Verzögerungen beim Aufbau der Produktionssysteme. XENON hat zur Umgehung der Lieferengpässe nach Möglichkeit auf bereits bestehendes Material aus früheren F&E-Projekten zurückgegriffen und die Verzögerungen im Projekt konnten im Jahr 2023 aufgeholt werden.

Nach Absprache im Konsortium wurde für das Vorhaben eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 4 Monate bis zum 31.07.2024 beantragt.

Materialkosten: Für den Aufbau des XENON-Maschinendemonstrators fielen mit knapp 30 T€ weniger Materialkosten als geplant an, u.a. da zur Umgehung der Lieferengpässe bei Lieferanten nach Möglichkeit auf bereits vorhandenes Material aus früheren F&E-Projekten zurückgegriffen wurde.

Personalkosten: Die Inbetriebnahme des Maschinendemonstrators bei XENON wurde ca. 1 Jahr vor Projektende realisiert. Damit wurde eine der arbeitsintensivsten Aufgaben von XENON früher als geplant abgeschlossen. Die bewilligten Personalkosten wurden daher nicht voll ausgeschöpft.

4. Wesentliche Ergebnisse

Folgende Aufgaben wurden durch XENON im Rahmen des Projekts bearbeitet:

- Entwicklung von automatisierten Prozessen für die Herstellung eines Leuchtmittels auf Basis einer 3D-gedruckten Basisform
- Auswahl dosierfähiges Material für Leiterbahnen
- Auswahl Dosiersystem + Vorversuche
- Auswahl Sensorik für Oberflächenvermessung Basisform + Vorversuche
- Generierung von NC-Code für Leiterbahndosierung
- Pick-and-Place von LEDS auf 3D-Oberfläche der Basisform
- Dosieren von Leitkleberbahnen auf 3D-Oberfläche der Basisform

Hierzu wurde ein Maschinendemonstrator auf Laborebene zum Funktionalitätsnachweis von ausgewählten Schlüsselprozessen entwickelt, aufgebaut und getestet.

Leistungsumfang Maschinendemonstrator XENON

- Simultan arbeitendes 6-Achs-System
- Vermessung von 2D- und 3D-Konturen
 - Anspruchsvollste Oberflächen möglich
 - Korrektur von Werkzeugverfahrwegen
 - Keine Vermessung unbekannter Bauteile möglich (NC-Code mit Grundkontur muss vorhanden sein)
- 2D- und 3D-Bestückung von Bauelementen für erweiterte Funktionalitäten
- 2D- und 3D-Dispensen
- Viskositätsunabhängige, rein volumetrische Dosierung auch von Klein- und Kleinstmengen

Unter Verwendung dieses Maschinendemonstrators wurden 4 Leuchtmittel hergestellt und dem Partner signify für Langzeittests zur Verfügung gestellt.

5. Zusammenarbeit

Projekttreffen

Treffen	Ort	Häufigkeit
Regeltelko AP2	online	monatlich
Regeltelko AP5	online	monatlich
Konsortialtreffen	Eindhoven HTC	Jul 2024
	Dresden XENON	Dez 2023
	Nürnberg neotech	Mai 2023
	Eindhoven TU	Okt 2022
	online	Mai 2022
	Eindhoven HTC	Sep 2021
	online	Jun 2021

Zusammenarbeit im Projekt mit folgenden Projektpartnern

neotech

- AP2
- Prozess-Entwicklung Dosieren auf 3D-Oberflächen

Signify

- AP5
- Luminaire-Herstellung (2D-Ring, 3D-Form)
- Auswahl LEDs
- Langzeittests Luminaire Proben

Fraunhofer IFAM

- AP3
- Auswahl Silber-Leitkleber für Dosieren von Leiterbahnen

TU Dresden

Im Rahmen des Projekts wurden drei studentische Arbeiten in Zusammenarbeit mit der TU Dresden durchgeführt.

- Tobias Krüger
- Franz Golberg
- Justin Just

Teil II: Ausführliche Darstellung der Projektergebnisse zu 16ME0338S

1. Ergebnisse

Auswahl Leitkleber

Für die Generierung der Leiterbahnen wurde eine leitfähige Klebepaste ausgewählt. Für diese Anwendung sind mehrere Materialien kommerziell auf dem Markt erhältlich, jedoch sind nicht alle für die Dosierung von leitfähigen Leitungen geeignet (s. Tabelle 1). Aufgrund einer Recherche nach verfügbaren Produkten wurde der Leitkleber PU 1015-12-3 (Polytec) ausgewählt, u.a. da dieses Material explizit für die Erzeugung von dosierten Leitbahnen beworben wird (s. Abbildung 8 und Tabelle 2). Der Leitkleber ist nach der Dosierung selbsthärtend, dennoch beschleunigt eine thermische Behandlung den Härteprozess (5-10 Minuten bei 100°C).

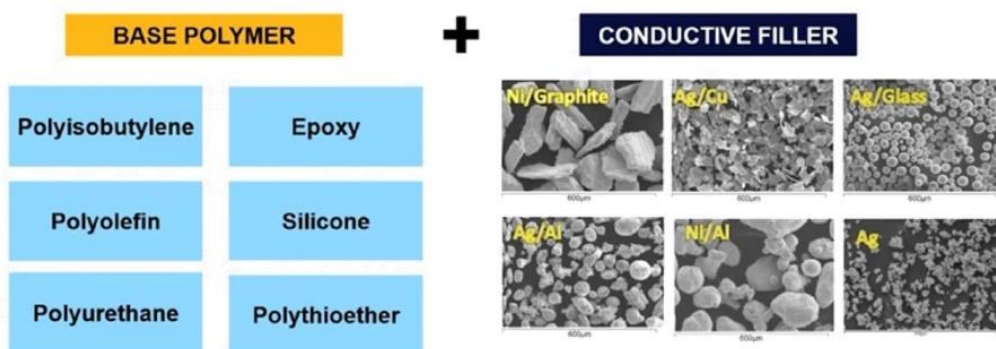


Abbildung 7 Beispiele für leitfähige gefüllte Pasten und Klebstoffe

Material	Hersteller	Bezeichnung	Füllstoffgehalt [m%]	Füllstoffabmessung [µm]	System	Dichte [g/cm³]	Viskosität [mPa·s]	Thixotropieindex [1/10]	Lagerung	Verarbeitungstechnologie	Topfzeit	Scherfestigkeit [Mpa]	Spezifischer elektrischer Widerstand	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Gebrauchstemperatur	Aushärteparameter	Besonderheiten	Preis
1	Polytec PT GmbH	Polytec PU 1015-12-3 Epoxy	k.A.	<30 µm Silber	1K, Polyurethan dispersion	2,9	cremig pastös, 15 000		3 Monate bei 5-8°C	Kontaktdispensen, Jetten, Handauftrag	k.A.	k.A.	5 · 10 ⁻⁵	k.A.	-55 bis 120, kurzfristig bis 150°C	min 15°C bei RT=23°C, 0,2 - 4h, bei 100°C 5 - 10 min, bei 180°C 2 s	Kunststoffdüsen aufgrund der guten Metallhaftung	162€/10 cm ³ (min 5 Stk.) 210€/30 cm ³ (min 2 Stk.)
2	Technology	H31	k.A.	<45 Silber	1K Epoxid	2,19	150.000- pastös		3 aber lange 1,5 bis 3 Monate bei 0 bis 10°C	Volumendispensen, Pin	28 Tage	9,1	5 · 10 ⁻⁴	1,1	>300°C	1h bei 150°C, 8 min bei 100°C		299,37€/28 g 54€/10g
3	Panacol	Elecolit® 3647	80	21,8 Silber	1K Epoxid	3,7-3,9	4.000 - 11.000	2 bis 3		Kontaktdispensen	24 h	4 bis 5	1 bis 3 · 10 ⁻⁴	4	-40 bis 180°C	100°C 3min, 120°C 90sec	flexibel	Kartusche = 14€/10 cm ³

Tabelle 1 Vergleich von auf dem Markt verfügbaren Materialien für Leitkleben

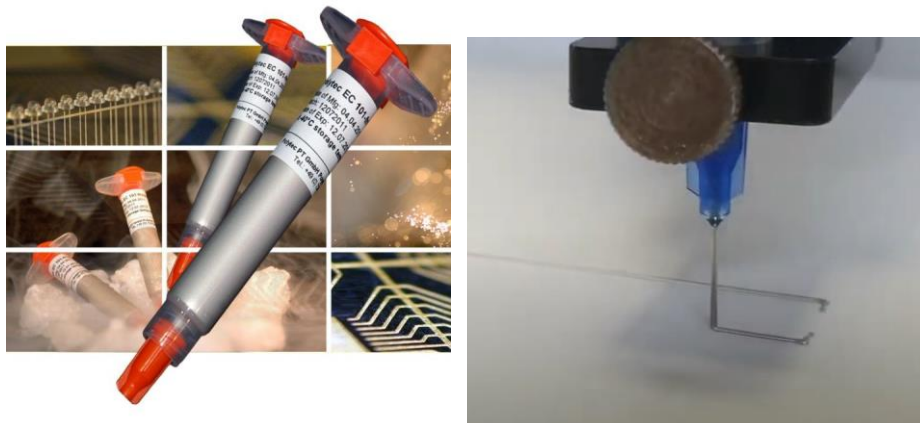


Abbildung 8 Handelsübliche Kartusche PU 1015-12-3 (links) und Dosieren von leitfähigen Linien (rechts) [Quelle: Polytec]

Tabelle 2: Eigenschaften des leitfähigem Klebstoffs (Polytec PU 1015 -12 -3)

Basis	Polyurethan
Dichte	2.9 g/cm ³
Füllmaterial	Silver
Partikelgröße	<30 µm
Betriebstemperatur	-55/+120 °C
Spez. Volumenwiderstand	5x10 ⁻⁵ Ωcm

Auswahl Dosiersystem

Für das Dosieren der Leiterbahnen aus mit Silber-Partikeln verfülltem Klebstoff wurde ein druckbeaufschlagtes volumetrisches Dispenssystem (Preflow eco-PEN450: Volumetrisches Dosiersystem für einkomponentige Materialien) verwendet. Ein solches System ist in der Anschaffung billiger als ein Jet-Dispenssystem, allerdings muss die Dosiernadel während des Dosiervorgangs in einem konstanten Abstand zur Oberfläche gehalten werden, was speziell bei Dosieren auf 3D-Oberflächen hohe Anforderungen an die Prozesssteuerung stellt.

Prozessentwicklung Dosieren

Für die Untersuchung der Prozessparameter beim Dosieren der Leiterbahnen wurde eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt. Dazu wurde das Dosierwerkzeug an einer Laboranlage mit einer einzigen Antriebsachse und für weitere Versuche am Achsportal eines handelsüblichen 3D-Druckers angebracht. Dieses System konnte über G-Code gesteuert werden und ermöglichte es, das Verhalten des leitfähigen Klebstoffs beim Drucken komplexerer Muster zu bewerten. Da die Steuerung des Maschinendemonstrators ebenfalls G-Code verwendete, konnten somit Ergebnisse direkt übertragen werden.

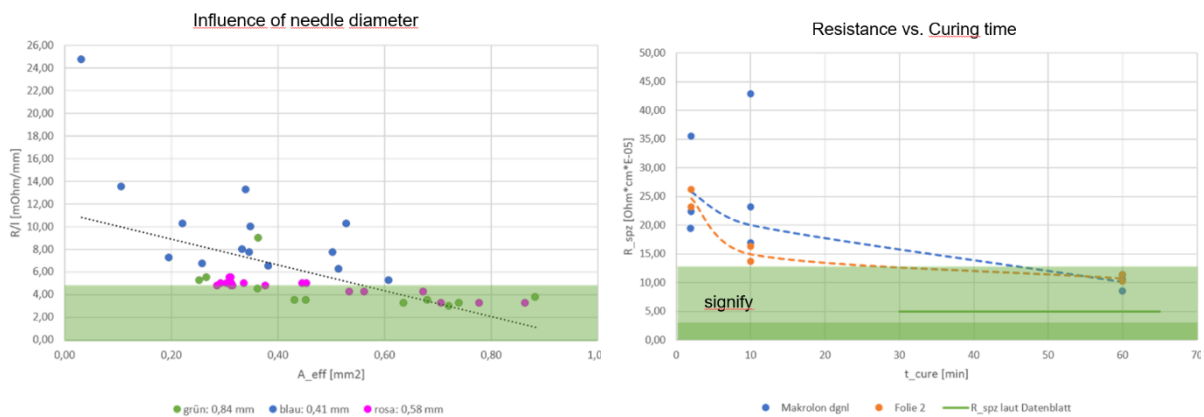


Abbildung 9: Links: Einfluss des Düsendurchmessers auf den elektrischen Widerstand; Rechts: Einfluss der Aushärtungszeit bei 80°C auf den spezifischen elektrischen Widerstand.

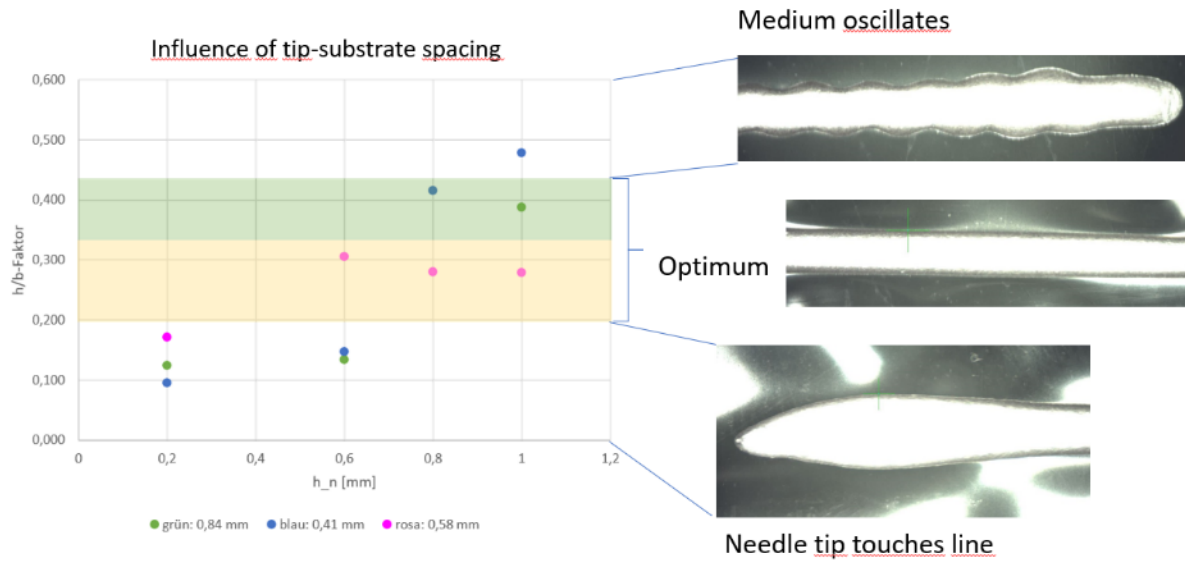


Abbildung 10: Einfluss des Spitzen-Substrat-Abstands auf die Linienstabilität.



Abbildung 11: Vordosierversuche auf Fiberglas-Substrat. Links: Mäander; Rechts: parallele Linien.

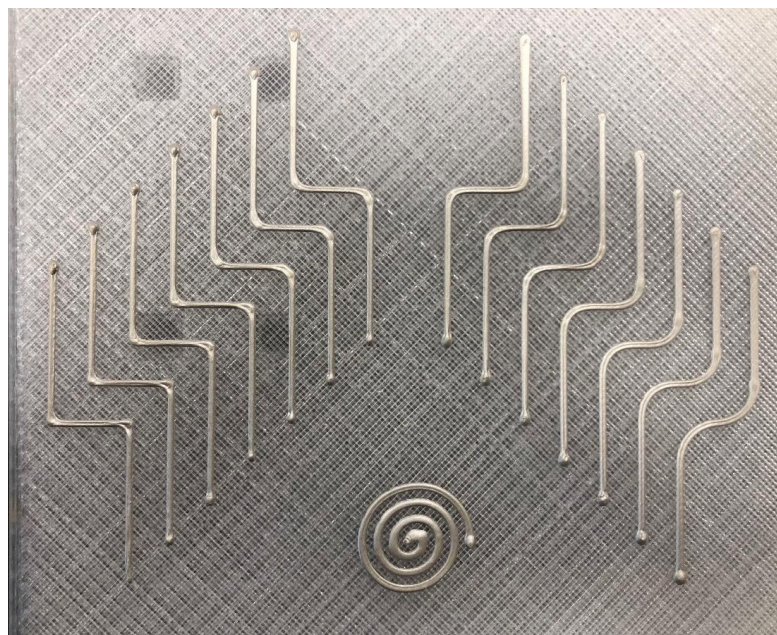


Abbildung 12 Untersuchung des Einfluss von Kurvenradien (0-5 mm) auf elektrischen Widerstand

Umfang der Dispense-Tests

1. Einfluss des Nadeldurchmessers: 3 verschiedene konische Kunststoffnadeln (unterschiedlicher Innendurchmesser der Nadelspitze: 0,41/0,59/0,84 mm)
2. Einfluss unterschiedlicher Aushärtungszeiten auf den elektrischen Widerstand im Ofen bei 80°C
3. Bestimmung optimaler Dosierparameter für dosierte Linien
4. Untersuchung der Eignung und des Verhaltens des ausgewählten leitfähigen Klebstoffs
5. Bestimmung des optimalen Nadelspitzen-Substrat-Abstandes
6. Bestimmung des optimalen Verhältnisses von Volumenstrom/Bewegungsgeschwindigkeit
7. Untersuchung des Materialverhaltens (Haftung, Reproduzierbarkeit)

In Abbildung 9 (links) ist der **elektrische Widerstand R/l als Funktion der effektiven Durchmesserfläche** von Dosierspitzen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei kleinstem Düsendurchmesser (0,41 mm) die Streuung der Werte zunimmt. Dies liegt daran, dass bei so kleinen Durchmessern das dosierte Material beim Verlassen der Düse zu oszillieren beginnt und nicht zu einer geraden Linie führt. Statistisch gesehen ist die Streuung für die Düsendurchmesser 0,59 mm und 0,84 mm gleich.

In Abbildung 9 (rechts) ist der **spezifische elektrische Widerstand R_{spec} als Funktion der Aushärtungszeit** bei 80°C Aushärtungstemperatur dargestellt. Nach einer Aushärtungszeit von 60 Minuten wurden Werte im vom Partner signify erwünschten Bereich erreicht. Das Verhalten der Grafik zeigt, dass bei längeren Aushärtungszeiten noch niedrigere Werte erreicht werden können und Werte im Bereich von $5 \cdot 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ möglich sind (vgl. Dokument D1.2).

In Abbildung 10 ist die **Höhe geteilt durch die Breite einer Linie als Funktion des Abstands zwischen Nadelspitze und Substrat dargestellt**. Aus optischen Bildern der Linien lässt sich erkennen, dass ein optimaler Entfernungsbereich vorhanden ist. Zu nah am Substrat besteht die Gefahr, dass die Nadelspitze in das dosierte Material eintaucht. Zu weit entfernt kann das dosierte Material nach verlassener Düse wieder zu oszillieren beginnen. Das Fenster zwischen 0,6-1,0 mm ist jedoch sehr klein, was darauf hindeutet, dass auf eine ebene Substratoberfläche und eine sorgfältige Kalibrierung der Parallelität von Werkstückträger und Achsportal sehr geachtet werden muss.

In Abbildung 11 finden sich die Ergebnisse von Musterdruckversuchen mit den identifizierten optimalen Dosierparametern (Mäander- und Parallellinien). Aus diesen Tests geht klar hervor, dass insbesondere **Start- und Endpunkt** einer Linie kritisch sind, während die Linien dazwischen stabil verlaufen. Es wurde festgestellt, dass Linien möglicherweise nicht an der angegebenen Position beginnen, sondern einige mm später. Die Parameter zur Vermeidung eines solchen Verhaltens wurden weiter angepasst, bis ein stabiles Startverhalten der Linien erreicht wurde.

Die Untersuchung des **Einflusses von Kurvenradien** auf den elektrischen Widerstand von dosierten Linien zeigte keine Abhängigkeit (s. Abbildung 12). Die Werte für den elektrischen Widerstand lagen unabhängig von Kurvenradius im erlaubten Bereich.

Um mehr Platz als auf den Makrolon-Scheiben zu haben, wurden die ersten vorläufigen Dosierversuche auf einem Fiberglas-Substrat durchgeführt. Weitere Tests wurden am eigentlichen Material von signify (Makrolon) durchgeführt (Scheiben mit 5 und 10 cm Durchmesser, s. Abbildung 13).

Erste Tests der Kontaktierung von LEDs mit leitfähigen Leitungen wurden erfolgreich durchgeführt (s. Abbildung 14).

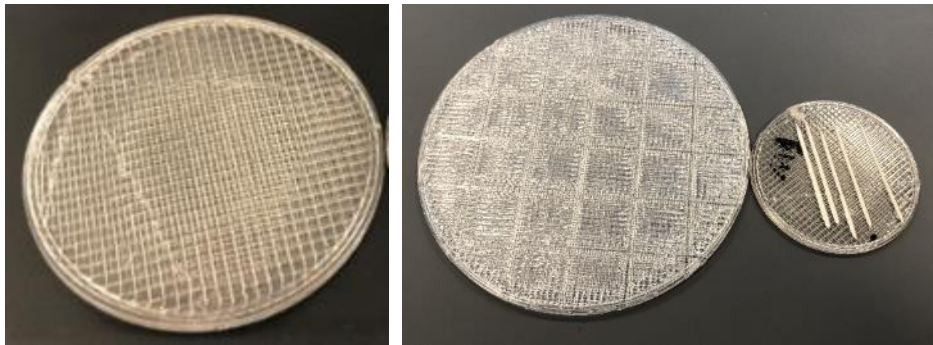


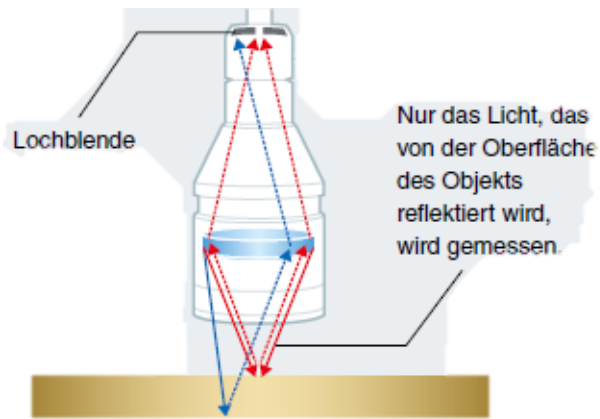
Abbildung 13: 3D-gedruckte Substrat-Scheiben (Material: Makrolon) zur Verfügung gestellt von signify. Links: 5 cm Durchmesser; Rechts: 10 cm Durchmesser.



Abbildung 14 Kontaktierung einer dosierten Mäanderstruktur mit 8 integrierten LEDs

Oberflächenvermessung

Für das Bestücken mit LEDs und das Dosieren von Leiterbahnen auf der Basisform ist das Vorliegen einer 3D-CAD Datei der Form zwingend notwendig, da bisher nicht auf unbekanntenen Formen dosiert werden kann. Grund ist, dass 3D-gedruckten Formen üblicherweise um mehrere Zehntel mm von der Idealform abweichen, was beim späteren Dosierprozess zu einer Kollision der Spitze der Dosiernadel mit der Oberfläche führen kann. Zur Oberflächenvermessung wurde zunächst ein Laser-Triangulations-Scanner geprüft, welcher sich jedoch als zu ungenau erwies. Im zweiten Schritt wurden Tests mit einem konfokalen chromatischen Sensor vorgenommen, mit dem sehr gute Ergebnisse erzielt wurden (s. Abbildung 14).



- Abstandermittlung durch Spektralanalyse
- Mögliche Messung auf transparenten oder spiegelnden Oberflächen
- Dickenmessung rauer und (halb)transparenter Objekte möglich
- Höchste Genauigkeit bei geringem Messabstand
- Kleiner Messpunkt ermittelt Oberflächenfehler
- Materialunabhängig → Glasdickenmessung

Abbildung 15 Funktionsweise konfokaler chromatische Sensor

Die gemessenen Abweichungen entlang des späteren Dosierpfades von der Idealform wurden zur Anpassung der z-Variablen (Höhe der Dosiernadel über Untergrund) verwendet (s. Abbildung 16).

Zusätzlich wurde für jede der Vertiefungen zur Aufnahme der LEDs ebenfalls eine Vermessung der Lage der Kanten durchgeführt. Wie sich zeigte, mussten die Kanten manuell nachbearbeitet werden, da es ansonsten zu fehlerhaften Vermessungen kommen konnte.

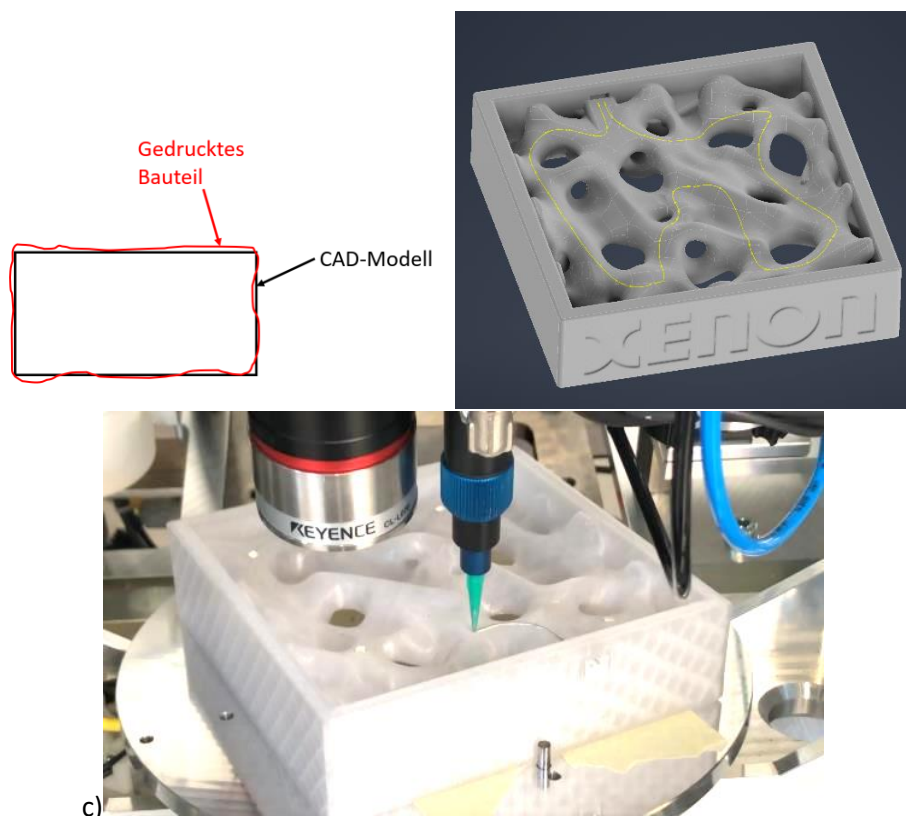


Abbildung 16 a) Schematische Darstellung der Abweichung eines gedruckten Bauteils vom idealen 3D-CAD Modell; b) Pfad der späteren Leiterbahnen auf der Oberfläche, der mit dem chromatischen Sensor vermessen wurde (s. c)

Maschinendemonstrator

Der von XENON im Projekt entwickelte Maschinendemonstrator (s. Abbildung 17) als Einzelzelle realisiert. Die Zelle enthält ein X-2Y-Z-Achsenportal mit drehbarer Z-Achse und einem unterhalb der Z-Achse positionierten Phi/Psi-Werkstückträger (neig- und drehbar). An der Z-Achse ist ein Dosierwerkzeug für die Erstellung von Leiterbahnen sowie eine automatische Schnittstelle des Greifers für die Handhabung und Platzierung von LEDs angebracht (s. Abbildung 19).



Abbildung 17: Maschinendemonstrator XENON für Luminaire-Herstellung.

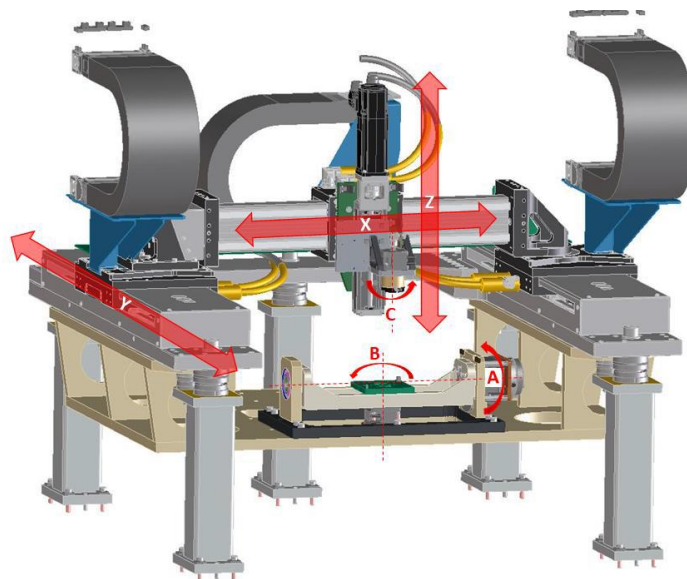


Abbildung 18 6-Achssystem (X-2Y-Z-Phi-Psi) des Maschinendemonstrators

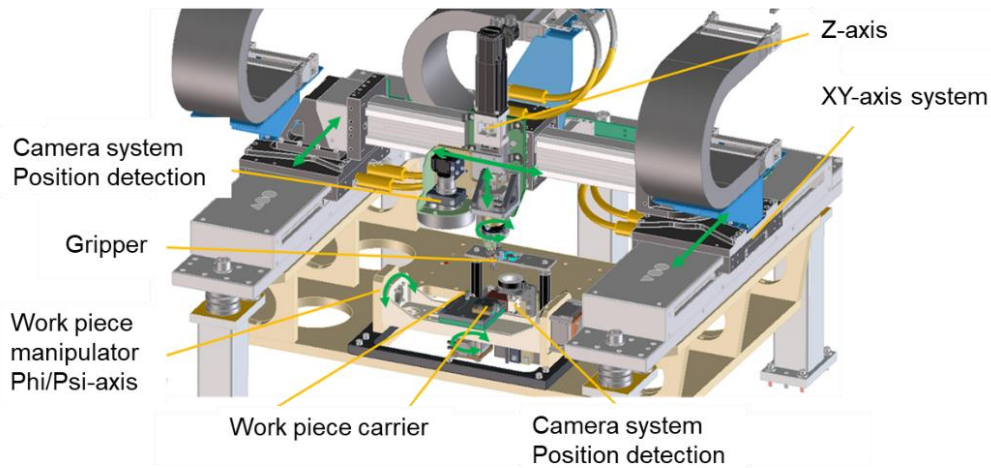


Abbildung 19: Überblick über den Prozessraum des Maschinendemonstrators. An der Z-Achse werden der Greifer für LEDs und das Dosiersystem angebracht.

Abbildung 20 zeigt eine Detailansicht des Innenraums des Maschinendemonstrators. Für die Platzierung von 3D-gedruckten Basiskörpern wurde ein Werkstückträger implementiert. Zusätzlich wurde eine Servicestation für den Dosierprozess hinzugefügt. Diese Station beinhaltet eine Reinigungsvorrichtung und eine Parkposition sowie ein Laserstrahlkreuz zur Kalibrierung der Dosiernadelspitze (s. Abbildung 21).

Zu den an der z-Achse angebrachten Werkzeugen gehören ein **konfokaler chromatischer Sensor** zur Abstandsmessung, eine **Dosiervorrichtung** und eine **Schnellwechselschnittstelle** für den Saugnapfgreifer (s. Abbildung 22). Dieser Greifer wird in Pick&Place-Prozessen eingesetzt, um LEDs in Hohlräumen der Basisform zu platzieren. Um eine zerstörungsfreie Platzierung der LEDs zu gewährleisten, ist der Greifer federgepuffert. Für den Zuführprozess von LEDs wurde eine Flachbettwanne mit Taschenreihen implementiert, die 50 LEDs aufnehmen kann (s. Abbildung 23).

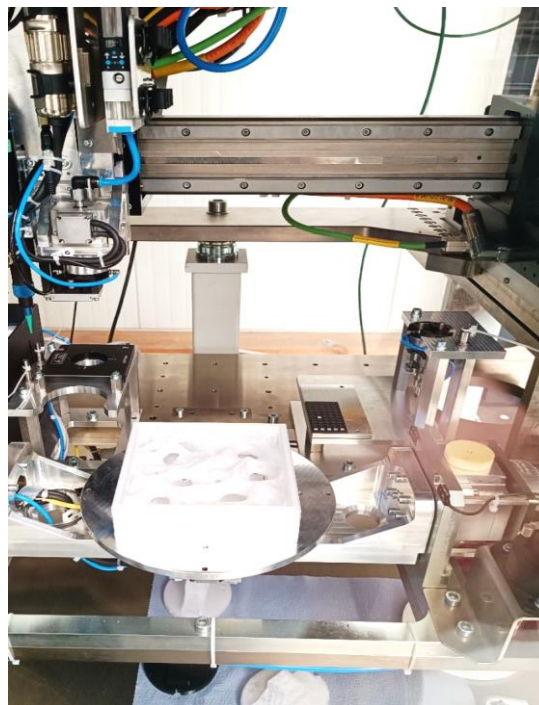


Abbildung 20 Prozessraum des Maschinendemonstrators



Abbildung 21 Links: Servicestation für Dosierwerkzeug; Rechts: Laserkreuz zur Nadelspitzenkalibrierung im XYZ-Raum

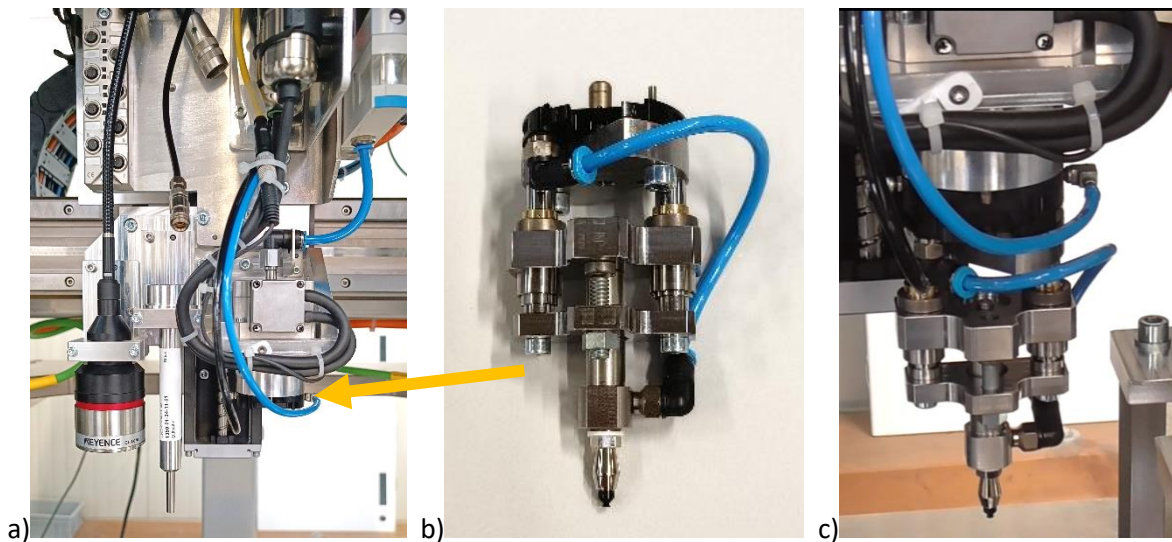


Abbildung 22: a) Abstandssensor (links), mit Dosierwerkzeug und Schnittstelle für LED-Greifer (rechts); b) Federgepufferter abnehmbarer Greifer (Saugnapf) für Pick&Place-Prozesse von LEDs; c) Greifer an Schnittstelle



Abbildung 23: Flachbettwanne mit Taschenreihen zur Bereitstellung von LEDs in Pick&Place-Prozessen

Generierung von NC-Code

Für die Steuerung des Maschinendemonstrators wurde ein sogenannter G-Code für numerische Kontrolle der Prozesse verwendet (s. Abbildung 24). Solche Programme sind auf jeder CNC-fähigen Maschine lauffähig. Allerdings gibt es für fast alle Maschinen spezielle Befehle, z. B. Zyklen, die nur von diesen Maschinen interpretiert werden können. Zyklen sind fertige Unterprogramme, die mit Parametern/Variablen angepasst werden. Mit ihnen lassen sich „Taschen“ (Rechteckkonturen oder ähnliche Taschen) oder Bohrungen etc. beschreiben. Diese Zyklen erleichtern die Programmierung und dienen der Übersichtlichkeit [Quelle: Wikipedia].

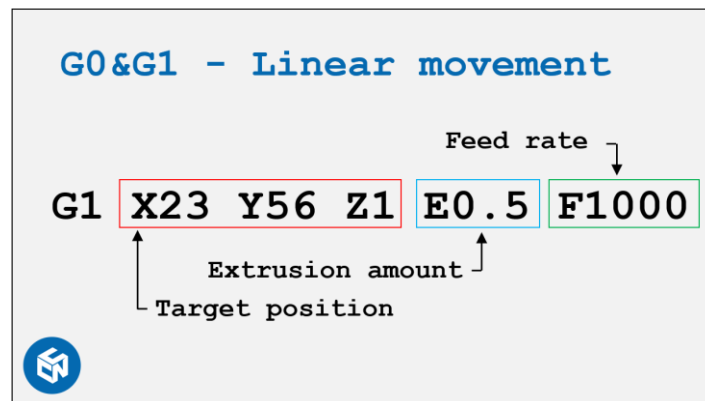


Abbildung 24 Beispiel für G-Code zur Prozesssteuerung

Es zeigte sich bei der Programmierung der Prozessabläufe, dass bei jeder Ein- und Ausfahrbewegung spezielle Parameter für die Bauteilvermessung gesetzt werden mussten. Zusätzlich musste die Ein- und Ausfahrbewegung aus dem Messprozess ausgeschlossen werden, da der verwendete Sensor zu träge reagierte. Eine automatische Generierung von NC-Code ist momentan noch nicht möglich, da speziell die Bereiche mit hohen Punktdichten und Start- und Stop-Sequenzen manuell im Code angepasst werden müssen. Die Korrektur der z-Höhen im Dosierprozess kann dagegen in einfacher Form (Addition/Subtraktion der gemessenen Differenz zur CAD-Form) vorgenommen werden.

Inbetriebnahme Maschinendemonstrator

Bei der Inbetriebnahme des Maschinendemonstrators wurden als erster Schritt 3D-gedruckte 2D-Ringformen erfolgreich mit LEDs bestückt und mit Leiterbahnen bedruckt. Im nächsten Schritt wurde in Zusammenarbeit mit dem Partner signify eine 3D-Basisform für ein optisch ansprechendes Leuchtmittel entworfen. Die finale Ausarbeitung der organischen Form sowie der Druck konnten über einen bei XENON vorhandenen 3D-Drucker realisiert werden (s. Abbildung 25). Die Struktur ist bereits direkt aus dem Drucker mit formlich passenden Vertiefungen für die Aufnahme der LEDs versehen. Die Leiterbahnen wurden dagegen ohne weitere Anpassungen direkt auf die Oberfläche der Struktur dosiert.

Nachdem die Leuchtmittel in früheren Versuchen noch mittels Krokodilklemmen mit der Stromquelle verbunden wurden, wurde für das finale Leuchtmittel eine Steckerverdingung nachträglich in den Rahmen eingefügt (s. Abbildung 26).

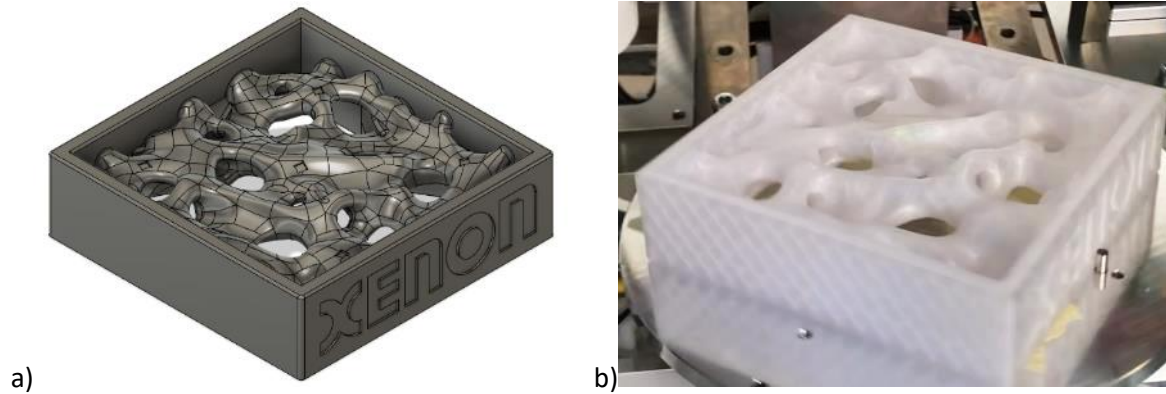


Abbildung 25 Neue Luminaire Basisform (organischer Struktur nachempfunden): a) 3D-Modell; b) Mit handelsüblichem Filament gedruckte Form

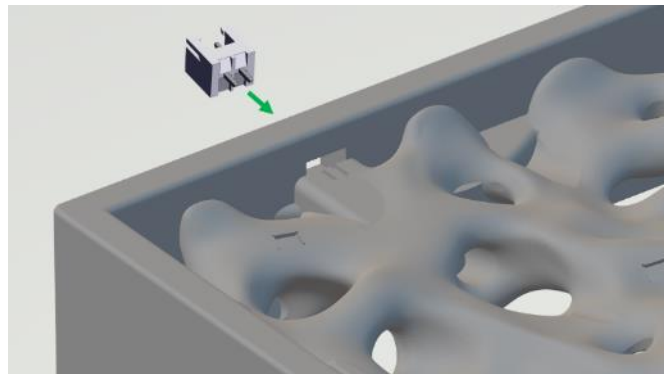


Abbildung 26 Schnittstelle für vereinfachten Stromanschluss des Leuchtmittels an Stromquelle

Pick and Place Prozess der LEDs

Nach der Vermessung der Oberfläche und der LED-Vertiefungen kann mit dem Bestückungsprozess der LEDs begonnen werden. Die LEDs werden dabei mittels Sauggreifer vollautomatisch aus einem Vorrats-Tray entnommen und in die vorgesehene Vertiefung abgelegt. Bereits hierbei rotiert und schwenkt die Basisform auf dem Werkstückträger, um die Vertiefung in korrekter Orientierung in die XY-Ebene zu bringen (s. Abbildung 27).

Anmerkung: Es wurde im Projekt auf ein automatisches Dosieren von Klebstoff zur Fixierung der LEDs verzichtet, da dies keinen innovativen Nutzen für den Prozess darstellt. Stattdessen wurde kurz vor dem Bestückungsprozess manuell ein Tropfen Sekundenkleber in jede Vertiefung gegeben.



Abbildung 27 Vollautomatisches Bestücken der Basisform mit LEDs

Herstellung Luminaire-Proben

Durch den begrenzten Prozessraum im Demonstrator können Leiterbahnen tw. nicht in voller Länge dosiert werden, ohne die Basisform dabei zu rotieren. Bei dieser Bauteilrotation bleibt die Nadel kurzfristig über einer Position der Basisform stehen, der Dosierprozess läuft jedoch weiter, da sich im jetzigen Demonstrator der Volumenstrom nicht als gesonderter Parameter aktiv regeln lässt. Daher kommt es bei der Rotation zu leichten Kugel-Anhäufungen von Material, welche die Funktionalität der Luminaire jedoch nicht beeinträchtigen.

Insgesamt wurden im Projekt 4 Luminaire-Proben generiert, welche dem Partner signify für Langzeittests zur Verfügung gestellt wurden. Für die Ergebnisse der Tests wird auf die Berichte von signify verwiesen. Die Funktionalität der hergestellten Leuchtmittel wurde bei XENON nachgewiesen (s. Abbildung 28). Zudem wurde beim Partner signify ein Leuchtmittel aus 4 einzelnen Luminares generiert (s. Abbildung 29).

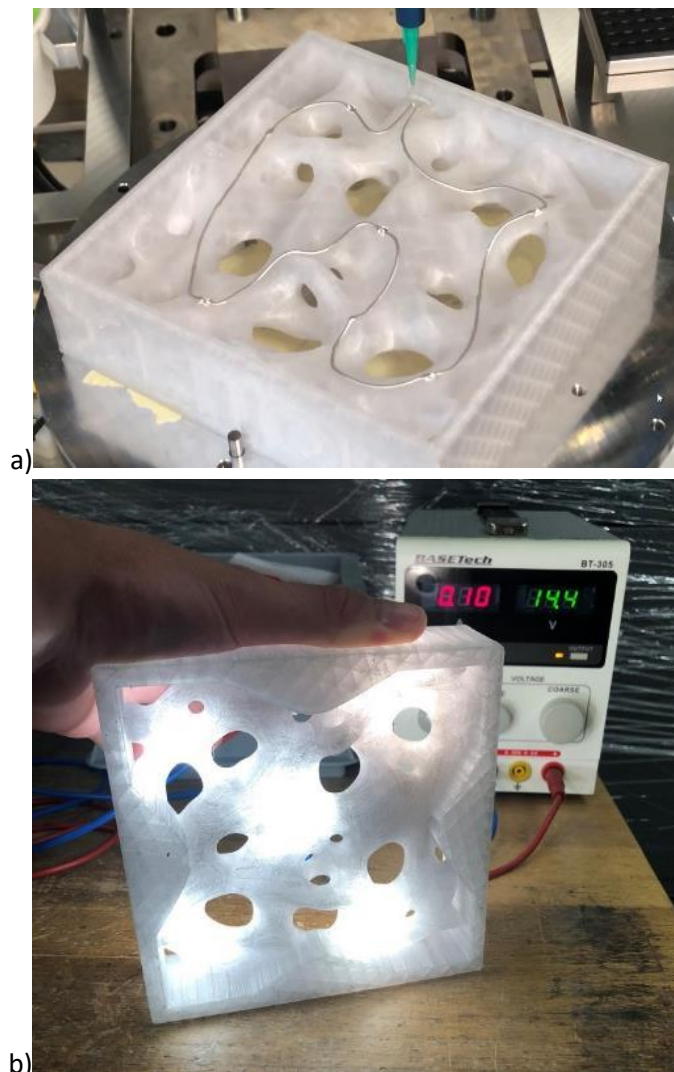


Abbildung 28 a) Luminaire Basisform mit eingesetzten LEDs und fertig dosierten Leiterbahnen; b) Funktionstest Luminaire



Abbildung 29 Verschaltete 4-fach Luminaire [Quelle: signify]

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises umfassen die Personalkosten für die am Projekt beteiligten Mitarbeiter aus den Bereichen Konstruktion, Steuerungsentwicklung und Montage (Details s. Dokument „Verwendungsnachweis), sowie die Materialkosten für den Maschinendemonstrator und die Reisekosten.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das Projekt AMPERE hat zu wesentlichen Fortschritten in mehreren Handlungsbereichen des Arbeitsplans geführt, wie in Teil II beschrieben. Die ursprünglich für XENON gesteckten Ziele konnten erreicht werden, jedoch nur durch die intensive Zusammenarbeit aller Projektpartner aus den Bereichen Forschung, Entwicklung sowie Integration. Dies unterstreicht, dass das Vorhaben für die beteiligten Partner risikobehaftet war, also technische Risiken sowie Verwertungsrisiken bestanden und auch zum Projektabschluss weiter bestehen. Dieser Umstand machte eine Förderung durch das BMBF notwendig.

Die Arbeiten, auch diejenigen ohne konkret positives Ergebnis, haben zum Erkenntnisgewinn beigetragen. Die Funktionalität der entwickelten automatisierten Prozesse, insbesondere der simultanen Steuerung von 6 Antriebsachsen im entwickelten Achsportal, wurde nachgewiesen.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Projektergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden durch den ZE keine Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen eingereicht.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)

Auch für XENON als Lieferant modernster Produktionsanlagen führen die kontinuierlich steigenden Anforderungen an prozesssichere Automatisierungslösungen für die Herstellung neu entwickelter mechatronische Produkte zu hohen Anforderungen. Die Projektergebnisse von AMPERE ermöglichen XENON die Verwendung bisher nicht verfügbarer Technologien und Prozessabläufe unter Verwendung XENON Automatisierungstechnik GmbH

von Multi-Achsportalen, welche u.a. bei der Bearbeitung von komplex geformten Bauteilen, sowie damit verbundenen Löt-, Schweiß-, Klebe- oder Bestückungsprozessen eingesetzt werden können. Damit können bisher undurchführbare Lösungen für Automatisierungsprozesse in dieser Form in zukünftigen Anwendungen implementiert und am Markt angeboten werden. Basierend auf den Ergebnissen und entwickelten Systemen im Projekt können Lösungen auch für andere Industriebereiche abgeleitet werden. So müssen beispielsweise für die Sensorproduktion mittlerweile sehr filigrane und bruchempfindliche Elemente verarbeitet werden, welche über ein Achsportal schneller und sicherer als mit Roboterarmen gehandhabt werden können. Darüber hinaus können die Ergebnisse auch für Lösungen im Kerngeschäft von XENON (Automotive oder Elektronik) eingesetzt werden, die die Verarbeitung empfindlicher Mikroelektronik-Komponenten beinhalten.

Bei der im Projekt AMPERE entwickelten Laboranlage handelt es sich um ein hochspezialisiertes F&E System, welches in den Punkten Stabilität der Ausführung und Genauigkeit der Achssysteme und Prozesse die Anforderungen von üblicherweise bei XENON entwickelten Kundensystemen teilweise überschreitet. Die Verwertung der entwickelten Laboranlage wird daher nicht im direkten Verkauf von ähnlichen Maschinenmodulen erfolgen, sondern hauptsächlich durch Stärkung der Firmenexpertise, der Schaffung von neuem Wissen und der Einsparung von Entwicklungszeit in folgenden Bereichen:

1. Auslegung von Multi-Achssystemen und Portalgestellen für hohen Genauigkeiten in der Größenordnung von 20 µm für Dispens- und Handhabungsprozesse. Das hier erarbeitete Wissen wird in den ersten 2-3 Jahren nach Projektende in die Entwicklung von neuen XENON-Standards für Achsportale einfließen und die Entwicklungszeit deutlich verkürzen.
2. Vertiefung der Expertise in der Abteilung Steuerungsentwicklung für die komplexe Aufgabenstellung der der simultanen Steuerung von 5- und 6-Achssystemen. Das an dieser Stelle generierte Wissen kann in den folgenden 2-3 Jahren in neuartige konzipierte Steuerungslösungen einfließen, welche bisher mit mehreren getrennten Achssystemen mit jeweils niedrigerem Freiheitsgrad gelöst wurden.

Es wird davon ausgegangen, dass durch die Punkte 1 und 2 folgende Einsparungen bei XENON erreicht werden können:

	eingesparte Zeit / Kapazität	eingesparte Kosten
1	15 PM	224.000 €
2	18 PM	280.800 €
	Summe	504.800 €

Die aktuell aufgrund der Folgen der COVID-19-Krise sehr angespannten Situation im Bereich Maschinenbau wird durch die genannten Einsparungen zum Teil entschärft. Diese leisten somit einen Beitrag zur Sicherung der bei XENON vorhandenen Arbeitsplätze. In den ersten 2-3- Jahren nach Projektende sollen die Projektergebnisse zudem durch die frühere Verfügbarkeit von neu zu entwickelnden Automatisierungslösungen in den oben aufgeführten Bereichen eine Steigerung von Ertrag und Umsatz und eine Verbesserung der Wettbewerbssituation ermöglichen.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die grundlegende Funktionalität der angestrebten Lösung wurde in ihren Grundlagen erfolgreich nachgewiesen. Es wird daher davon ausgegangen, dass die technischen Erfolgsaussichten wie im Antrag beschrieben bestehen bleiben. Bis zur Serienreife muss noch eine Weiterentwicklung des bisherigen Systems erfolgen, um den gängigen Industriestandards zu genügen.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Durch die Ergebnisse im Projekt AMPERE liegt eine Laboranlage für die hochgenaue und flexible Bearbeitung und Handhabung von 3D-Bauteilen vor. Die Laboranlage dient jedoch lediglich dem Funktionalitätsnachweis von Schlüsselprozessen.

Es wird geschätzt, dass für eine experimentelle Weiterentwicklung des Gerätes zusätzlich 12 PM Entwicklungsarbeit geleistet werden müssen. Diese Arbeiten beinhalten u.a.

- Automatisierung der Verkettung mit vor- und nachgelagerten Prozessen
- Integration des weiterer Bearbeitungsprozesse (Laserschweißen, Löten, etc)
- Umrüstung der Anlagenkomponenten auf Anforderungen für Dauerbetrieb
- Taktzeitoptimierung

Es wird geschätzt, dass für eine Weiterentwicklung des Gerätes zur Serienreife zusätzlich weitere 9 PM Entwicklungsarbeit geleistet werden müssen. Diese Arbeiten beinhalten u.a.

- Datenschnittstelle zum MES des Kunden (inline – Fähigkeit der Anlage)
- Sicherstellung der Bediener-sicherheit und Erfüllung gängiger Industrienormen
- Bedienungskomfort erhöhen (Touchscreen, Steuerungsmenü, Fehlermeldungen, Service- und Wartungsanweisungen, ...)

5. Während der Projektlaufzeit bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Projektzeitraum sind bei XENON keine projektbezogenen Fortschritte bei dritten Stellen bekannt geworden.

6. Veröffentlichungen

Im Projektzeitraum wurden durch XENON keine schriftlichen Veröffentlichungen in Fachzeitschriften o.ä. vorgenommen.

Ein Exemplar dieses Abschlussberichts wird an die Technischen Informationsbibliothek (TIB Hannover) verschickt.

Messen

Zur Dissemination von Projektergebnissen und Expertisen werden seitens XENON standardmäßig Ausstellungen auf Messen (extern und im Haus) genutzt. Zu nennen sind hier z.B. die Veranstaltungen

- Automatica
- Productronica
- SMT-Hybrid & Packaging
- Hannover Messe

Bei den aufgeführten Messen handelt es sich um von XENON in der Regel jährlich besuchte Veranstaltungen. Mit vielen Altkunden von XENON finden auf diesen Messen standardmäßig Treffen statt, und sind daher optimal für die Präsentation von Neuentwicklungen geeignet. Zudem sind speziell Messen wie die Productronica weltweit führend im Bereich der technischen Ausrüstung für Elektronikfertigung, so dass durch die hohe Anzahl von Firmenvertretern ein Kontakt mit einer großen Anzahl von potentiellen Neukunden möglich ist.

Marketingmaßnahmen

XENON nutzt zur Darstellung der Expertisen und Stärken der Firma in umfangreichen Maße die Möglichkeiten der Internetpräsentation (www.xenon-automation.com). Des Weiteren steht für XENONs Marketingarbeit ein etabliertes Team von Mitarbeitern zur Verfügung. Diese sind insbesondere auf die Direktansprache von Kunden spezialisiert, da ein solches Vorgehen im Bereich Sondermaschinenbau der üblichen Vertriebsarbeit entspricht.

In regelmäßigen Abständen werden Hausmessen zur Information der potenziellen Kundschaft genutzt. Zusätzlich steht durch die Mitgliedschaft von XENON in Verbänden wie Silicon Saxony, AND und IAK geeignete Instrumente zur Verfügung, die entwickelte Technologie in innovativen Produkten umzusetzen.