



Developing Innovative and Attractive CVET programmes in industrial shoe production

Train-the-Trainer Manual STEM

IO 3

Dieses Projekt wurde mit Unterstützung der Europäischen Kommission finanziert. Die Unterstützung der Europäischen Kommission für die Erstellung dieser Veröffentlichung stellt keine Billigung des Inhalts dar, welcher nur die Ansichten der Verfasser wiedergibt, und die Kommission kann nicht für eine etwaige Verwendung der darin enthaltenen Informationen haftbar gemacht werden.

Kofinanziert durch das
Programm Erasmus+
der Europäischen Union





Dieses Werk steht unter der Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. Um eine Kopie dieser Lizenz anzusehen, besuchen Sie:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>,

oder senden Sie einen Brief an Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

Projektdaten:

Programm: Erasmus+

Projekt-Titel: Developing Innovative and Attractive CVET programmes in industrial shoe production

Acronym: DIA-CVET

Project 2020-1-DE02-KA202-007600

Laufzeit: 01.09.2020- 31.08.2023

Website: www.dia-cvet.eu

Herausgeber: Andreas Saniter

Autoren und
Autorinnen: DE: Sabina Krebs, Tatjana Hubel (PFI Pirmasens);
Klaus Ruth, Andreas Saniter, Vivian Harberts (ITB);
PT: Rita Souto, Cristina Marques (CTCP), Fátima Martins,
Ricardo Sousa (CFPIC), Carla Matos (CARITÉ);
RO: Aura Mihai, Bogdan Sarghie, Arina Seul (TU Iasi).

Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Ziele des DIA-CVET Projekts	3
1.2	Leitfäden, an denen sich Ausbilder und Trainer orientieren können.....	3
1.3	Beziehen Sie Ihre Ausbildung auf den Geschäftsprozess der industriellen Schuhproduktion.....	3
2	MINT in der Schuhindustrie	5
2.1	Einleitung	5
3	Automatisierung und Roboter	5
3.1	Was ist ein Roboter	5
3.2	Roboter und Menschen.....	6
3.3	Verschiedene Arten von Robotern	7
3.4	Wie funktioniert ein Roboter?	8
3.5	Programmierung eines Roboters	9
	Manuelle Programmierung.....	9
	Teach in.....	9
	CAM unterstützte Programmierung	9
3.6	Bestehende Verfahren in der Industrie	10
4	3D-Drucken - Additive Fertigung	11
4.1	Überblick über die verschiedenen Techniken.....	11
	Stereolithographie.....	11
	Fused Deposition Moulding	12
	Selektives Laser-Sintern oder Selektives Laser-Schmelzen	12
	Material Jetting.....	13
	Binder Jetting	13
4.2	Druckvorbereitung / Slicer	14
4.3	Probleme und Schwierigkeiten	14
4.4	Überblick	15
5	Maschinelle Bildverarbeitung	16
5.1	Was ist maschinelle Bildverarbeitung?	16
5.2	Was ist ein Bild?.....	16
5.3	Schlüsselkomponenten.....	16
	Licht.....	16
	Objektiv.....	16
	Sensor der Kamera.....	17

5.4 Bildverarbeitung.....	18
Erkennung von Barcodes und QR-Codes.....	18
Farbkontrolle.....	18
Flächenmessung.....	19
Fehlererkennung.....	19
Positionserkennung.....	19
Augmented reality.....	19
6 Anatomie und Biomechanik.....	20
6.1 Bewegungsapparat.....	20
6.2 Anatomie der Füße.....	20
6.3 Gangart-Zyklen.....	20
6.4 Messverfahren.....	21
7 Sensoren.....	21
7.1 Was kann gemessen werden?.....	21
7.2 Wie können Sensoren messen?.....	21
Entfernung.....	21
Geschwindigkeit.....	22
Beschleunigung.....	22
Gyroskop.....	22
Temperatur.....	22
Magnetische Felder.....	22
Druck / Kraft.....	23
7.3 Trägheitsmessgerät (IMU).....	23
7.4 Lokale Sensoren.....	23
7.5 Mobile Sensoren.....	24
7.6 Einsatz von Sensoren in Schuhen.....	24
8 Abbildungen.....	25

1 Einleitung

1.1 Ziele des DIA-CVET Projekts

Die Ziele des Erasmus+ Projekts «Developing Innovative and Attractive CVET programmes in industrial shoe production» (kurz: DIA-CVET, Entwicklung innovativer und attraktiver Weiterbildungsprogramme in der industriellen Schuhproduktion) sind

- die Entwicklung, Pilotierung und Evaluation von Kursen für die Handlungsfelder von Meistern in der industriellen Schuhproduktion auf europäischer Ebene; verfügbar in Englisch (EN) sowie in DE, RO und PT,
- und die Entwicklung eines sektoralen Qualifikationsrahmens der Stufen 5 und 6 zum Referenzieren bestehender oder neu entworfener nationaler Qualifikationen aus Deutschland, Portugal und Rumänien.

1.2 Leitfäden, an denen sich Ausbilder und Trainer orientieren können

Der Zweck der Leitfäden besteht darin, die benannten Ausbilder auf ihre Rolle vorzubereiten und ihnen Inhalte und Unterstützung zu bieten. Aufgrund des Charakters der Handlungsfelder von Vorarbeitern enthalten sie keine spezifischen Formen der Ausbildung; wir schlagen jedoch einen alternierenden Ansatz vor. Erfolgreiche Programme der beruflichen Weiterbildung kombinieren theoretischen Unterricht mit der Anwendung der erworbenen Kenntnisse, Fertigkeiten und Kompetenzen (KSC) in realen Arbeitsumgebungen. Die Aufgaben eines Ausbilders sind:

- Handlungsfelder-spezifische KSC zu vermitteln,
- die Tätigkeiten, die die Lernenden erlernen sollen, zu demonstrieren,
- die Lernenden in jede neue Aufgabe einzuführen und sie bei den ersten Versuchen zu betreuen,
- lernortübergreifende Aktivitäten (z. B. Projekte) zu organisieren und zu beaufsichtigen,
- die Lernenden zu einer selbständigen Durchführung der Aufgaben des jeweiligen Handlungsfeldes anzuleiten.

Die dreizehn Leitfäden sind nicht dazu gedacht, ein Lehrbuch zu ersetzen. Sie sollen die Ausbilder bei der Planung der arbeitspraktischen Aktivitäten mit den Lernenden unterstützen. Die Ausbilder sollten zusätzlich weitere Unterlagen aus anderen Quellen (Lehrbücher aus der eigenen Ausbildung etc.) hinzuziehen.

1.3 Beziehen Sie Ihre Ausbildung auf den Geschäftsprozess der industriellen Schuhproduktion

Die industrielle Produktion ist ein komplexer Prozess, in dem das dieser Leitlinie zugrundeliegende Handlungsfeld in den Geschäftsprozess eingebettet ist. Bevor Sie mit der Schulung zu einem bestimmten Handlungsfeld beginnen, stellen Sie bitte sicher, dass die Lernenden mit den anderen Handlungsfeldern von Industriemeistern in der Schuhproduktion vertraut sind.

Die Lernenden sollten z. B. mit den Produktarten, die das Unternehmen herstellt, und ihrem Verwendungszweck, den verschiedenen Kundensegmenten, den Vertriebskanälen usw. vertraut gemacht werden. Sie sollten die Produktentstehungs- und Herstellungsprozesse kennen, d. h. Produktdesign, Modellbau, Einkaufsabteilung, Produktionsplanung und alle Produktionsabteilungen bis hin zu Lager und Logistik.

Der Produktionsprozess (nicht Teil von DIA-CVET, für Einblicke siehe: <http://icsas-project.eu/>) steht im Zentrum des Geschäftsprozesses; die Handlungsfelder von DIA-CVET spielen eine vorbereitende, unterstützende oder begleitende Rolle (siehe Abb. 1).

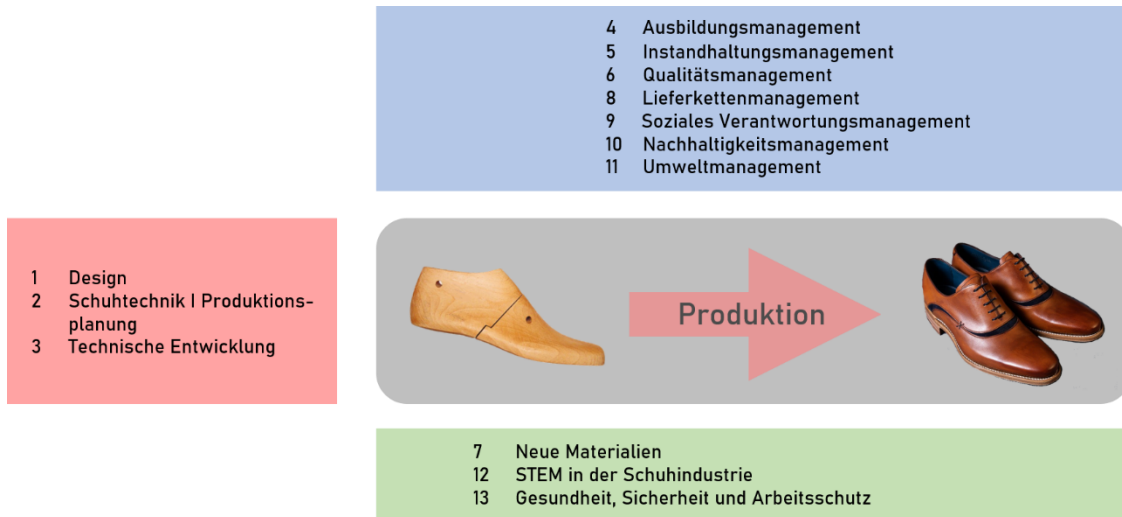


Abb. 1: Tätigkeitsbereiche in DIA-CVET und ihre Beziehung zum Produktionsprozess.

2 MINT in der Schuhindustrie

2.1 Einleitung

Die adidas Speedfactory™ ist ein berühmtes Projekt eines deutschen Schuhherstellers, bei dem der Einsatz von Robotern und automatisierten Prozessen in der Öffentlichkeit große Beachtung gefunden hat. Für Menschen, die mit der Schuhindustrie nicht vertraut sind, sieht es so aus, als sei der Einsatz von numerisch gesteuerten Robotern etwas Neues und Revolutionäres. Aber das ist es nicht!

Im Jahr 1996 investierte Brightwood, ein in Florida ansässiger Hersteller von Sportschuhen, in drei Staubli RX90-Roboter, die für Rau- und Klebearbeiten eingesetzt wurden. Diese Roboter waren in der Lage, 1800 Paar Schuhe in acht Stunden zu bearbeiten. Dies war ein notwendiger Schritt, um mit der Produktion der Konkurrenten im Ausland mithalten zu können, wo ähnliche Aufgaben von Hand erledigt werden. Aber schon früher, im Jahr 1980, hatte die skandinavische Schuhmarke Eccolet SKO eine Partnerschaft mit Klockner DESMA geschlossen, um Sohlen direkt auf das Oberteil ihrer Produkte zu spritzen. Im Jahr 1984 installierten sie in einer ihrer Fabriken den ersten Hilfsroboter.

Obwohl Maschinen bei einigen Aufgaben sehr effektiv sind und menschliche Fähigkeiten leicht übertreffen können, sind einige andere Aufgaben, die für eine menschliche Hand trivial sind, eine Herausforderung für Roboter, die sie bis heute nicht gemeistert haben. Ein perfektes Beispiel dafür ist das Schnüren eines fertigen Schuhs

3 Automatisierung und Roboter

3.1 Was ist ein Roboter

Ein Roboter, insbesondere ein Industrieroboter, ist ein programmierbares System, welches für wiederholende Aufgaben in Fertigungsprozessen eingesetzt wird. Zu den typischen Anwendungen von Robotern gehören Schweißen, Lackieren, Montieren, Demontieren, Bestücken von Leiterplatten, Verpacken und Etikettieren, Palettieren, Produktinspektion und Testen, die alle mit hoher Ausdauer, Geschwindigkeit und Präzision ausgeführt werden

Im Jahr 2020 werden nach Angaben der International Federation of Robotics (IFR) weltweit schätzungsweise 1,64 Millionen Industrieroboter in Betrieb sein.



Abb. 2: 6-Achsen-Roboter mit Greifer © PFI

Definition nach VDI-Richtlinie 2860

[DE] „Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen bzw. menschlichen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“

[EN] "Industrial robots are universally applicable automatic movement machines with several axes, the movements of which are freely programmable regarding the sequence of movements and paths or angles (i.e., without mechanical or human intervention) and, if necessary, are sensor-controlled. They can be equipped with grippers, tools or other production means and can carry out handling and / or production tasks."

– VDI-Guideline 2860

Definition der Robotic Industries Association

"Ein Roboter ist ein programmierbarer, multifunktionaler Manipulator, der dazu bestimmt ist, Material, Teile, Werkzeuge oder spezielle Geräte durch variable programmierte Bewegungen zu transportieren, um eine Vielzahl von Aufgaben auszuführen."

Definition nach JARA (Japan Robot Association)

Manueller Manipulator: Nicht automatisiertes Handhabungsgerät, das direkt vom Benutzer gesteuert wird.

Roboter mit fester Abfolge: Handhabungsgerät mit einem festen Bewegungsmuster. Das Ändern dieses Musters ist relativ aufwändig.

Variabler Sequenz-Roboter: Handhabungsgerät, wie zuvor beschrieben, jedoch mit der Möglichkeit, die Bewegungsabfolge schnell und einfach zu ändern.

Wiedergaberoboter: Der Bewegungsablauf wird diesem Gerät einmalig vom Bediener vorgeführt und im Programmspeicher abgelegt. Mit den im Speicher enthaltenen Informationen kann der Bewegungsablauf nach Bedarf wiederholt werden.

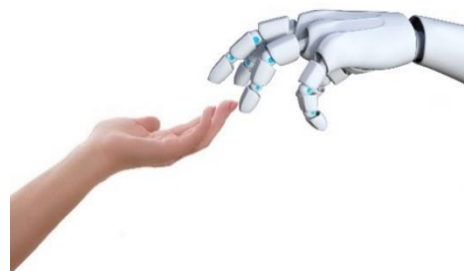
Numerisch gesteuerter Roboter: Dieses Handhabungsgerät funktioniert auf ähnliche Weise wie eine NC-gesteuerte Maschine. Die Informationen über den Bewegungsablauf werden numerisch über Tasten, Schalter oder Datenträger in das Gerät eingegeben.

Intelligenter Roboter: Diese höchste Roboterklasse ist für Geräte gedacht, die über verschiedene Sensoren verfügen und somit in der Lage sind, den Programmablauf automatisch an Veränderungen des Werkstücks und der Umgebung anzupassen.

Trotz der verschiedenen Definitionen ist das gängige Verständnis eines Roboters ein programmierbare Vorrichtung, die mindestens drei frei bewegliche Achsen hat.

3.2 Roboter und Menschen

In der Vergangenheit arbeiteten Roboter und Menschen meist getrennt voneinander. Diese Trennung ist auch heute noch in vielen Bereichen der Produktion relevant und wird durch komplexe Absperrungen und Sicherheitsvorkehrungen deutlich gemacht. Diese sollen verhindern, dass ein Mensch in den Arbeitsbereich eines aktiven Roboters gelangt und durch dessen Bewegungen verletzt oder gar getötet wird. Zu den verschiedenen Möglichkeiten, Arbeitsbereiche von Robotern gegen unbefugtes Betreten zu sichern, gehören zum Beispiel Käfige mit überwachten Sicherheitstüren, Lichtschranken oder auch



Zugangsbeschränkungen für ganze Räume oder Hallen. Das Auslösen dieser Schutzmaßnahmen bedeutet in der Regel ein sofortiges Anhalten der betroffenen Maschinen in Verbindung mit einem optischen und / oder akustischen Alarm.

Trotz der Gefahr, die von Robotern für den Menschen ausgeht, gibt es verschiedene Lösungen, die eine Zusammenarbeit von Mensch und Maschine ermöglichen. In diesem Fall muss sichergestellt werden, dass der Roboter entweder physisch nicht in der Lage ist, den Menschen zu verletzen, oder dass verschiedene intelligente Sicherheitsmaßnahmen dafür sorgen, dass der Roboter keine Bewegungen ausführt, die zu einer gefährlichen Kollision mit dem Arbeiter führen könnten.

Diese Sicherheitsmaßnahmen können sein:

- Näherungssensoren
- Berührungssensoren
- Laser-Abstandssensoren
- 3D-Scanner
- Videosysteme gepaart mit industrieller Bildverarbeitung

Zusätzlich kann der Roboter mit Kraft- oder Drehmomentsensoren ausgestattet werden, die eine Kraftrückmeldung an seine Steuereinheit liefern. Auf diese Weise kann er erkennen, ob der Benutzer mit ihm interagiert und entsprechend auf seinen Partner reagieren.

Aber: Solche Systeme sind hochkomplex, und schon kleine Fehler können zu einem kompletten Stillstand der Maschine führen, denn die Sicherheit des Menschen steht immer an erster Stelle. Diese Komplexität schlägt sich auch im Preis nieder, sowohl in der Anschaffung als auch in der Wartung. Im Sinne der Definition von JARA würde man dies als intelligenten Roboter bezeichnen.

3.3 Verschiedene Arten von Robotern

Wenn Sie an Industrieroboter denken, ist das gängigste Modell, das Sie sich vorstellen können, ähnlich wie das im Kapitel "Was ist ein Roboter" gezeigte. Es handelt sich um eine fünf- bis sechssachsig armähnliche Struktur mit einem Werkzeug an der Spitze. Dieser Typ ist die vielseitigste Konstruktion und kann verschiedene Aufgaben übernehmen, von der Handhabung von Teilen und der Beschickung anderer Maschinen bis hin zur Montage von Produkten oder sogar zum Fräsen, Schweißen oder 3D-Drucken. Ein sechssachsiger Roboter kann jeden beliebigen Punkt in seinem Raum erreichen, wobei das Werkzeug in jede gewünschte Richtung ausgerichtet ist. Bei fünf Achsen ist die Ausrichtung des Werkzeugs teilweise begrenzt und hängt von der Position ab, die der Roboter anfahren soll.



Abb. 3: Scara Roboter © PFI

Ein weiteres gängiges Modell ist ein so genannter Scara-Roboter. Er wird meist für Pick-and-Place-Aufgaben eingesetzt, bei denen Geschwindigkeit und Präzision zu moderaten Kosten erreicht werden müssen. Die Kinematik eines Scara-Roboters ist auf eine Ebene beschränkt, mit einem höhenverstellbaren Manipulator. Mit dieser Einschränkung ist es einfacher, ein hohes Maß an Steifigkeit und Präzision zu erreichen, während die Geschwindigkeit und die Kosten moderat bleiben.

Der letzte typische Teilnehmer auf diesem Gebiet ist der Delta-Roboter. Wie der Scara-Roboter wird er hauptsächlich für Pick-and-Place-Aktivitäten eingesetzt, bei denen Geschwindigkeit und Kosteneffizienz wichtiger sind als Präzision und Vielseitigkeit. Wie beim Scara-Typ ist die Werkzeugachse fixiert und bleibt senkrecht zur Arbeitsebene.



Abb. 4: Delta Roboter © PFI

3.4 Wie funktioniert ein Roboter?

Die Aufgabe fast jedes Roboters besteht in der Positionierung eines Werkzeugs oder Werkstücks im 3D-Raum. Dazu verfügt der Roboter über mehrere Arme, die mit Gelenken in einer definierten Weise verbunden sind. Diese Verkettung wird als Kinematik bezeichnet und ist in der Software zur Steuerung der Maschine mathematisch dargestellt.

Alle Transformationen und Drehungen der Gelenke können in Matrizen ausgedrückt werden, was die Berechnung der genauen Bewegungen aller Achsen der Kette erleichtert. Viele dieser Berechnungen sind bei jedem Bewegungsschritt des Roboters erforderlich. Obwohl es sich bei den meisten Roboterachsen um Rotationsachsen handelt, führt eine Drehung in einer Achse zu einer Drehung und meist auch zu einer Verschiebung aller Gelenke weiter unten in der Kette. Glücklicherweise haben moderne Computer mehr als genug Rechenleistung, so dass sich all die komplexe Mathematik hinter einer übersichtlichen und intuitiven Benutzeroberfläche verbirgt, die die Steuerung und Programmierung des Roboters für verschiedene Aufgaben erleichtert.

Aber all die Mathematik und die Software wären nutzlos, wenn es nicht ein elektrisches und elektronisches Netzwerk von Sensoren und Aktoren (Motoren) gäbe, die all die Bits und Bytes in reale Aktionen umsetzen. Da sind also die Sensoren, die der Steuerung mitteilen, wo sich der Roboter gerade befindet. Die Steuerung vergleicht diese Ist-Werte mit den im laufenden Programm festgelegten Soll-Werten und regelt die Motorleistung entsprechend. Dieser Regelkreis läuft die ganze Zeit, in der der Roboter aktiv ist, sei es bei einer komplexen Bewegung oder nur beim Halten einer Position.

Und zu guter Letzt ist da noch der mechanische Teil des Roboters. Genau das ist es, was wir sehen. Normalerweise eine sehr steife und stabile Konstruktion aus Stahl und Kunststoff, umwickelt mit zahlreichen Kabeln und Druckluftleitungen. Diese Konstruktion nimmt die Lasten, Kräfte und Drehmomente der verschiedenen Aktionen auf. Das Bestreben in dieser Disziplin ist es, eine Konstruktion zu schaffen, die steif genug ist, um die Lasten zu bewältigen, aber nicht zu schwer, so dass sie die Maschine zu sehr verlangsamen würde. Dieses mechanische Erscheinungsbild bestimmt auch den möglichen Handhabungsbereich und den Platzbedarf für die Installation.

3.5 Programmierung eines Roboters

Es gibt verschiedene Methoden, einem Roboter zu sagen, was er tun soll.

Manuelle Programmierung

Ein ausgebildeter Programmierer programmiert alle Aktionen des Roboters manuell. Dies geschieht häufig in einer speziellen Programmiersprache namens G-Code. G-Code ist eine universelle Sprache für CNC-Maschinen und besteht aus einer langen Liste von Befehlen, die der Maschine sagen, was sie als Nächstes tun soll. Obwohl es einige Abkürzungen und Hilfsprogramme für einige typische Aktionen gibt, ist dies eine sehr mühsame Aufgabe, und ein einfacher Tippfehler kann von einer leichten Fehlausrichtung bis hin zu einer totalen Katastrophe alles verursachen.

Teach in

Das Teach-in-Verfahren ist eine intuitive Methode zur Programmierung eines Industrieroboters. Ein Benutzer steuert den Roboter direkt und zeichnet die Positionen und Aktivitäten manuell auf, so dass der Roboter diese Aktionen wiederholen kann. Dieses Verfahren erfordert normalerweise kein hohes Maß an Ausbildung und kann ohne Programmierkenntnisse durchgeführt werden.

CAM unterstützte Programmierung

Eine Software unterstützt den Benutzer bei der Definition der Aktionen des Roboters. Dabei kann es sich um ein einfaches Tool handeln, das den Roboter simuliert, und der Benutzer kann Teach-In und manuelle Programmier Techniken kombinieren, um eine Aktion zu programmieren. Es gibt aber auch weitaus komplexere Situationen, in denen eine ganze Produktionslinie in der Software simuliert wird und die Benutzer die kombinierten Aktionen aller Arten von Maschinen programmieren und simulieren können. Dies ist die anspruchsvollste Art der Programmierung und der Weg, den man in einer komplexen Produktionsumgebung gehen sollte. Die Roboter können programmiert werden, während sie noch arbeiten.



Abb. 5: CAM-System DEScom von DESMA; Programmierung eines Schrappzyklus auf Basis von 3D-CAD-Daten; Visualisierung der Werkzeugbahn und -orientierung. (Bild von DESMA)

3.6 Bestehende Verfahren in der Industrie

Einer der ersten Akteure auf dem Gebiet der Automatisierung und der Roboter in der Schuhindustrie war die Firma DESMA. Wie in der Einleitung erwähnt, installierte das Unternehmen 1980 die erste Maschine, mit der Sohlen direkt auf das Oberteil gespritzt wurden. Inzwischen bietet das Unternehmen komplette Automatisierungslösungen für die Schuhindustrie an, wie auf dem Bild unten zu sehen ist. Ein Karussell mit mehreren Stationen für das Spritzgießen wird von Robotern mit den Oberteilen versorgt, und das fertige Produkt wird ebenfalls automatisch entnommen und auf ein Förderband zur weiteren Verarbeitung gelegt.

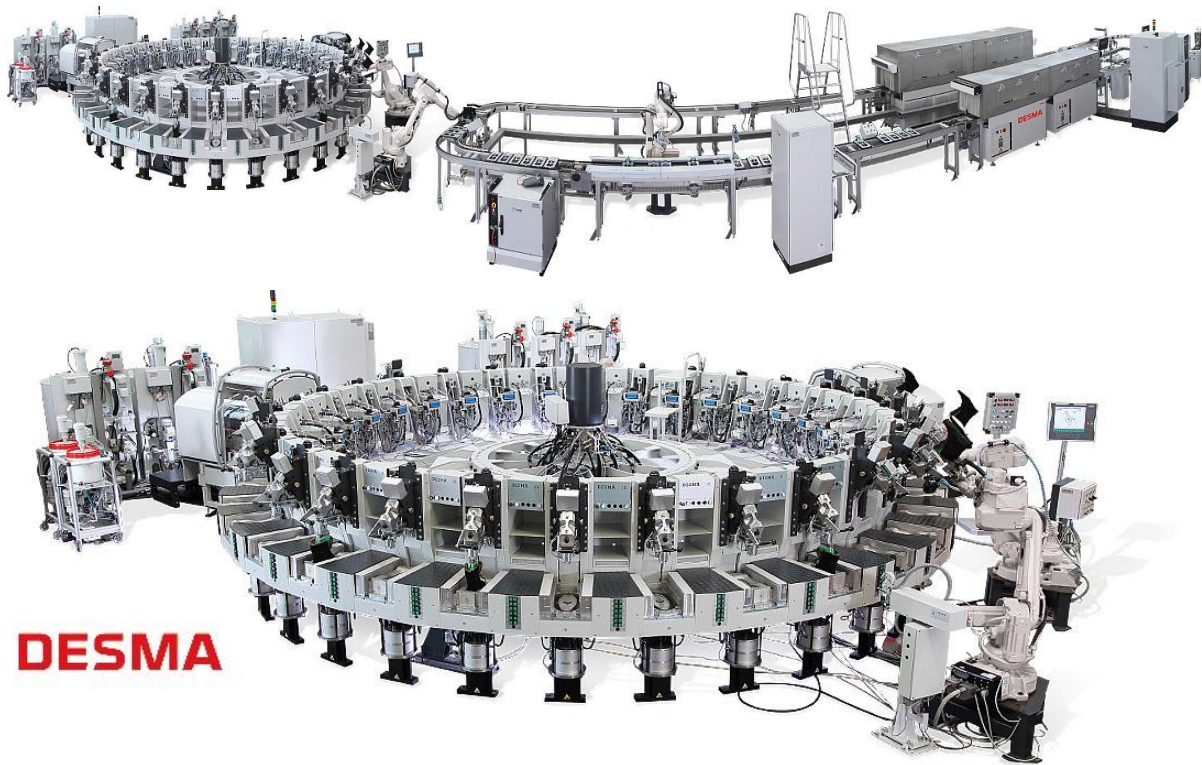


Abb. 6: Hochautomatisierte Spritzgießanlage von DESMA (Bilder von DESMA)

4 3D-Drucken - Additive Fertigung

Noch vor einiger Zeit waren Fertigungsverfahren in der Industrie hauptsächlich subtraktive Verfahren, bei denen aus einem vorhandenen Rohmaterial durch Materialabtrag die gewünschte Geometrie gewonnen wird. Die bekanntesten Verfahren sind wohl das Drehen, Fräsen und Schneiden. In den letzten Jahren sind jedoch zunehmend additive Verfahren in den Vordergrund getreten, sowohl im industriellen als auch im privaten Bereich. Die sinkenden Kosten für 3D-Drucker und die immer besseren Materialien machen additive Verfahren für eine Vielzahl von Anwendungen immer attraktiver. Der 3D-Druck ist ein additives Verfahren, bei dem das Material Schicht für Schicht aufgetragen wird, um die gewünschte Geometrie zu erzeugen. Das Rohmaterial kann in verschiedenen Formen vorliegen, beispielsweise als Draht, Pulver oder Flüssigkeit. Die Verfestigung des Materials an den gewünschten Stellen erfolgt entweder thermisch oder chemisch. Der größte Vorteil des 3D-Drucks ist die kurze Zeitspanne, die vom CAD-Modell bis zum fertigen Teil benötigt wird, insbesondere bei hochkomplexen Geometrien. Außerdem bietet es den Konstrukteuren einen neuen Freiheitsgrad, da die Komplexität des Werkstücks für den Herstellungsprozess nahezu irrelevant ist, selbst ineinandergreifende Teile oder komplexe innere Strukturen sind möglich.



Abb. 7: links: subtraktiver Prozess (dunkelblau: gewünschter Teil, hellblau: entferntes Material) rechts: additiver Prozess (dunkelblau: Basisschicht, grün: hinzugefügte Schichten) © PFI

4.1 Überblick über die verschiedenen Techniken

Im Bereich des 3D-Drucks gibt es verschiedene Ansätze, um das Material gezielt einzusetzen.

Stereolithographie

Das wohl älteste Verfahren ist die sogenannte Stereolithografie, die 1984 patentiert wurde. Bei diesem Verfahren wird ein lichtempfindliches Medium selektiv mit einem Laserstrahl ausgehärtet, um die gewünschte Struktur Schicht für Schicht zu erzeugen. Im medizinischen Bereich wurde dieses Verfahren häufig zur Erstellung von physikalischen Modellen aus CT-Daten verwendet.

Heutzutage wird der Laser teilweise durch einen LCD-Bildschirm ersetzt, der selektiv eine UV-Lichtquelle oder einen UV-Projektor zum Aushärten des Materials blockiert. Nach dem Druck müssen die Teile gewaschen und mit UV-Licht nachgehärtet werden.

Mit dieser Methode können sehr detaillierte Teile mit einer hochwertigen Oberfläche hergestellt werden, aber die verwendeten Fotopolymere sind giftig und schädlich für die Umwelt. Die physikalische Stabilität hängt stark von den verwendeten Chemikalien ab, kann aber recht gut sein. Auch flexible Materialien sind möglich. Verschiedene Unternehmen in der Schuhindustrie experimentieren mit dieser Methode, um Sohlen mit speziellen Strukturen für unterschiedliche Dämpfungseigenschaften zu drucken.

AM BESTEN FÜR: Funktionales Prototyping, Muster, Formen und Werkzeugbau

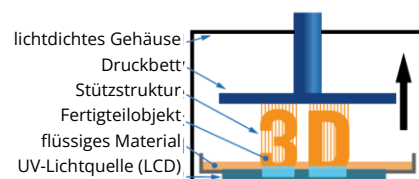


Abb. 8: Schaltplan eines SLA-Druckers mit LCD-Lichtquelle © PFI

Fused Deposition Moulding

Das wohl gängigste 3D-Druckverfahren verwendet geschmolzenen Kunststoff zur Herstellung des Teils. Das Rohmaterial wird einem beheizten Extruder zugeführt, wo es schmilzt und dann an der gewünschten Stelle durch eine Düse gepresst werden kann. Der Extruder und die Düse werden von einer CNC-ähnlichen Maschine geführt, bei der es sich auch um einen Roboter handeln kann. Eine beheizte Grundplatte dient als Druckfläche für die erste Schicht. Alle weiteren Schichten werden übereinander aufgetragen. Der Drucker braucht also eine Druckunterlage, und wenn ein Teil Überhänge hat, braucht der Drucker so genannte Stützstrukturen. Diese Strukturen werden von der Druckersoftware automatisch berechnet, können aber auch von einem erfahrenen Benutzer geändert werden, um den Prozess zu beschleunigen. Das Entfernen dieser Strukturen nach Abschluss des Druckvorgangs ist Teil der manuellen Nachbearbeitung und kann eine mühsame, aber für das Endprodukt notwendige Aufgabe sein.

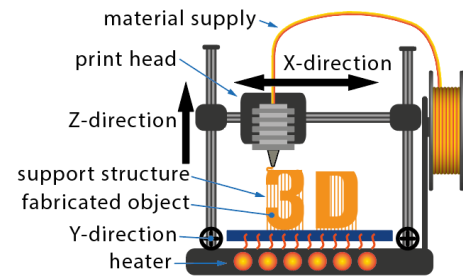


Abb. 9: Schema eines FDM-Druckers © PFI

Die Qualität der Teile hängt stark von den für den Druck verwendeten Einstellungen ab. Für optimale Einstellungen braucht der Anwender einige Erfahrung, insbesondere wenn viele verschiedene Materialien verwendet werden. Ein paar Grad Celsius mehr oder weniger am Extruder können den Unterschied zwischen guten Teilen und einem misslungenen Druck ausmachen. Dies ist der billigste Einstieg in die Welt des 3D-Drucks, mit Druckern der Einstiegsklasse in einer Preisspanne zwischen 200\$ und 500\$.

AM BESTEN FÜR: Grundlegende Proof-of-Concept-Modelle und einfaches Prototyping.

Selektives Laser-Sintern oder Selektives Laser-Schmelzen

Dabei handelt es sich um ein additives Fertigungsverfahren, bei dem ausgewählte Bereiche eines Pulverbettes durch Wärmeenergie miteinander verschmolzen werden. Nachdem die gewünschten Bereiche verschmolzen sind, wird das Bett abgesenkt und eine neue Pulverschicht aufgetragen. Die erforderliche Energie wird mittels eines Lasers, der den aktuellen Querschnitt des Bauteils abtastet, in das vorgewärmte Pulvermaterial eingebracht. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass das ungeschmolzene Pulver als Stützstruktur für die oberen Schichten dient und nach dem Druck einfach weggeblasen werden kann. Es müssen also keine speziellen Stützstrukturen gedruckt werden und das mühsame Entfernen dieser Elemente entfällt. Auch Metalle sind verarbeitbar, aber es ist ein geeignetes Nachsinterverfahren erforderlich, um wirklich metallähnliche Materialeigenschaften zu erzielen.

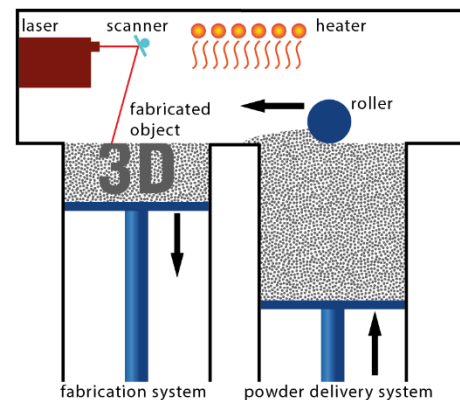


Abb. 10: Schema eines SLS/SLM-Systems © PFI

Die Oberfläche von SLA/SLM-gedruckten Strukturen ist körnig, kann aber in der Nachbearbeitung geschliffen werden, um eine glatte Oberfläche zu erhalten. Die Gesamtstabilität der Teile ist eine der bestmöglichen und die Schichten sind nahezu unsichtbar. Je nach verwendetem Pulver sind Materialeigenschaften von flexibel bis starr möglich. Aufgrund der geringen Toleranzen und der Stabilität des Prozesses können diese Teile als Funktionselemente in verschiedenen Arten von

Produkten verwendet werden. All diese Vorteile haben jedoch ihren Preis, und zwar die Kosten für die Maschinen und die dazugehörige Infrastruktur. Eine einzelne Maschine beginnt bei etwa \$100.000 und benötigt 10 oder mehr Quadratmeter Platz mit einem Starkstromanschluss. Die zusätzliche Ausrüstung für das Pulverrecycling und die Nachbearbeitung der Teile ist darin nicht enthalten.

AM BESTEN FÜR: Funktionsprototyping und Produktion für den Endverbraucher.

Material Jetting

Das Druckprinzip ähnelt dem eines herkömmlichen Tintenstrahldruckers, aber statt Tinte wird ein lichtempfindliches Polymer gedruckt, das durch UV-Licht ausgehärtet wird. Wie ein typischer Desktop-Drucker, der in der Regel mit vier Farben (Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz) druckt, verfügt auch ein Materialstrahlendrucker über getrennte Druckköpfe, die auf unterschiedliche Weise verwendet werden können. Dabei kann es sich um das gleiche Material in verschiedenen Farben handeln, aber auch um Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften.

So können beispielsweise ein hartes und ein weiches Material verwendet und sogar miteinander gemischt werden, um eine unterschiedliche Flexibilität des Teils zu erreichen. Ein weiterer Vorteil ist die Verwendung eines speziellen Trägermaterials, das in der Regel nach dem Druck leicht zu entfernen ist. Daher sind keine expliziten Stützstrukturen erforderlich, was die Nachbearbeitung der Teile erheblich erleichtert.

Das ist zwar ein teures Verfahren, aber die Möglichkeit digital gemischter Materialien oder sogar fotorealistischer Farben ist eine Eigenschaft, die die meisten anderen Druckverfahren nicht bieten können. Daher wird diese Technik meist für Design oder haptisch orientierte Prototypen von Konsumgütern verwendet.

AM BESTEN FÜR: Funktionsprototyping mit Schwerpunkt auf Haptik und Design

Binder Jetting

Das Binder-Jetting-Verfahren ist so etwas wie eine Kombination aus selektivem Lasersintern und Materialstrahlverfahren. In diesem Fall injiziert ein Druckkopf ein Bindemittel Schicht für Schicht in ein Pulverbett, um das endgültige Teil zu formen. Wie bei anderen Pulverbettverfahren werden keine Stützstrukturen benötigt. Dieses Verfahren ist schneller als das selektive Lasersintern und ermöglicht eine fotorealistische Farbgebung, aber die Teile sind ohne spezielle Nachbearbeitung spröde. Auch Metalle sind verarbeitbar, aber es ist ein geeignetes Nachsinterverfahren erforderlich, um wirklich metallähnliche Materialeigenschaften zu erzielen.

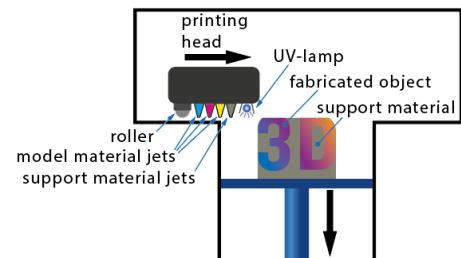


Abb. 11: Schematische Darstellung eines Materialdruckers © PFI

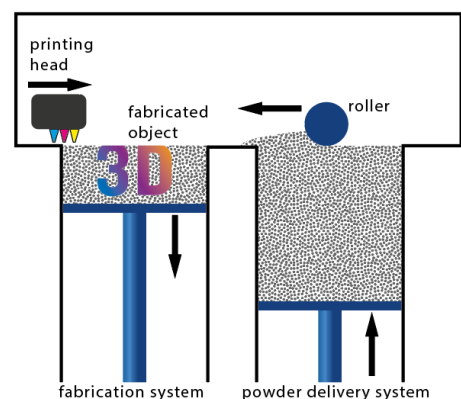


Abb. 12: Schema eines Bindemitteldruckers © PFI

AM BESTEN FÜR: Funktionsprototyping mit Schwerpunkt auf Design und Endfertigung

4.2 Druckvorbereitung / Slicer

Die Vorbereitung eines 3D-Teils für den Druck ist relativ einfach, kann aber einen großen Einfluss auf die benötigte Druckzeit und die Qualität des Teils haben.

Der erste Schritt besteht darin, das gewünschte Teil zu importieren und es im Druckvolumen zu platzieren. Die Drucksoftware (der Slicer) wählt normalerweise selbst eine gute Ausrichtung für das Teil. Zu Demonstrationszwecken wird die T-artige Struktur absichtlich in eine Ausrichtung gebracht, in der ein hoher Anteil an Stützstrukturen erforderlich ist (blau). Wie Sie jedoch sehen können, ist ein kleiner Überhang auch ohne Unterstützung möglich.

Anschließend passen Sie die Druckeinstellungen nach Bedarf an. Die wichtigste Einstellung in Bezug auf Qualität und Druckzeit ist die Dicke der Schichten. Dünne Schichten ermöglichen feine Details, sind aber langsamer.

Dicke Schichten können schnell aufgetragen werden, haben aber gröbere Strukturen.

Je nach verwendetem Druckverfahren gibt es noch viele weitere Einstellungen, die man anpassen und feinjustieren kann. Insbesondere beim FDM-Verfahren gibt es viele Parameter wie Temperatur, Kühlgebläse, Menge der Füllung (Material im Inneren des Teils), Materialvorschub, Druckkopfgeschwindigkeit, usw. Eine gute Software bietet Ihnen eine Reihe von Voreinstellungen, die speziell auf Ihren Drucker zugeschnitten sind, z. B. "Entwurf", "Normal" und "Hohe Qualität".

Nachdem Sie alle Einstellungen vorgenommen haben, berechnet das Programm die Querschnitte der einzelnen Schichten und, je nach verwendetem Drucker, die Anweisungen für die Maschine. In einer 3D-Ansicht können Sie eine Vorschau des Druckvorgangs sehen und abschätzen, ob das Verfahren effektiv sein wird und das Ergebnis Ihren Vorstellungen entspricht.

4.3 Probleme und Schwierigkeiten

Obwohl der 3D-Druck viele neue Möglichkeiten eröffnet und den Designern viele Freiheiten lässt, handelt es sich immer noch um eine sehr neue Technologie. Das zeigt sich besonders bei der Materialentwicklung, wo es ständig Verbesserungen und Neuentwicklungen auf dem Markt gibt. Diese Entwicklungen sind auch notwendig, da die physikalischen Eigenschaften der gedruckten Teile entscheidend dafür sind, ob und wie sie in Endverbraucher-Produkten verwendet werden können.

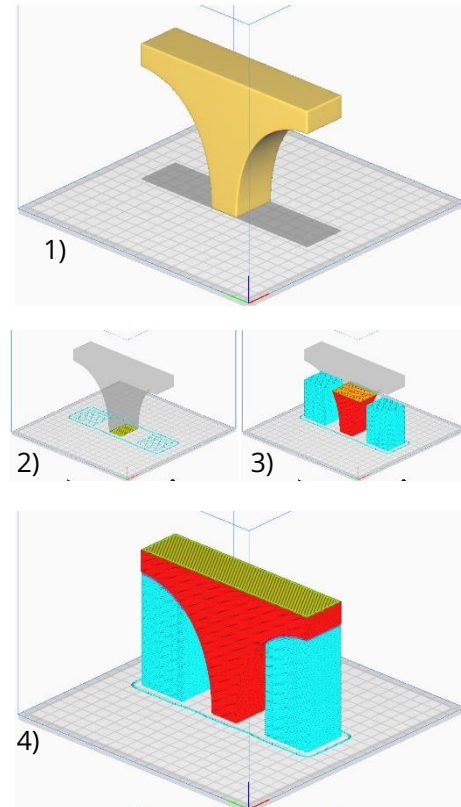


Abb. 13: Slicer für einen FDM-basierten Druck. 1) platziertes Teil; 2) Vorschau der ersten Schicht; 3) Mitte des Drucks mit sichtbarer Füllung (orange); 4) fertiges Teil
© PFI

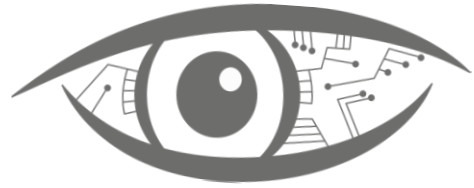
4.4 Überblick

	SLA/DLP	FDM	SLS/SLM	MJT	BJT
Oberflächenqualität	hoch	gering bis mittel	sandig	hoch	medium
Toleranzen	mittlere	schlecht	gut	gut	mittlere
Haltbarkeit	mittel bis hoch	mittlere	hoch	niedrig	niedrig bis mittel
Farbe möglich	Einzelfarbe	1-4 Farben	Einzelfarbe	mehrfarbig	mehrfarbig
Stützstrukturen	ja	ja	nein	nein	nein
Hardwarekosten	niedrig	niedrig	hoch	hoch	mittlere
Materialkosten	mittlere	niedrig	mittlere	hoch	mittlere
Benutzererfahrung	Sicherheitshinweise	Erfahrung erforderlich	Sicherheits-hinweise	nur Wartung	nur Wartung

5 Maschinelle Bildverarbeitung

5.1 Was ist maschinelle Bildverarbeitung?

Die maschinelle Bildverarbeitung beschreibt den Prozess der Erfassung und Verarbeitung von Bilddaten, um verschiedene Arten von Informationen zu sammeln, die für die Prozesskontrolle und/oder -validierung verwendet werden können.



5.2 Was ist ein Bild?

Aus der Sicht des Computers ist ein Bild nur eine Matrix beliebiger Werte, die die Farbintensitäten für Rot, Grün und Blau ausdrücken. Diese drei Farben sind die Basis, aus der alle sichtbaren Farben gemischt werden. Das ist ähnlich wie die Funktionsweise unserer Augen. Auch sie haben drei verschiedene Rezeptorzellen, die entweder für das rote, grüne oder blaue Lichtspektrum empfindlich sind. Wenn Sie zum Beispiel gelbes Licht sehen, bedeutet das, dass Ihre roten und grünen Rezeptoren gleichermaßen ausgelöst werden, und Ihr Gehirn interpretiert dies als gelb.

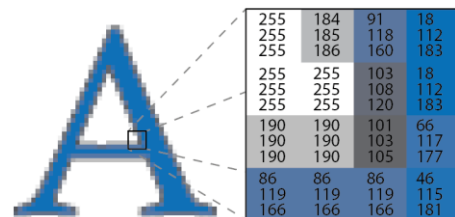


Abb. 14: RGB-Farbwerte der verschiedenen Pixel © PFI

Bei typischen Bildern hat jeder Wert für jeden Kanal einen Bereich zwischen 0 und 255 (8 Bit). 0 bedeutet keine und 255 die maximale Intensität in diesem Kanal. Abbildung 14 auf der rechten Seite zeigt die additive Mischung dieser Werte (Farben).

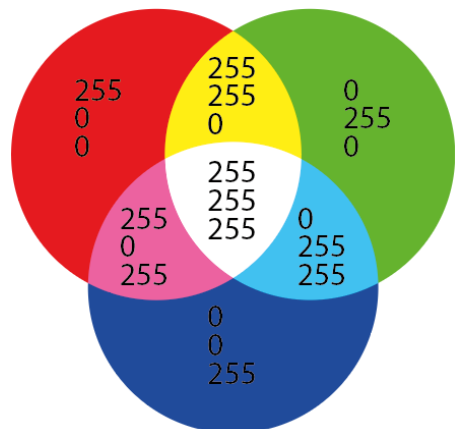


Abb. 15: additives Mischen von Farben © PFI

5.3 Schlüsselkomponenten

Für die Bildverarbeitung werden folgende Komponenten benötigt:

Licht

Für die industrielle Bildverarbeitung wird in der Regel künstliches Licht verwendet. Zwar kann auch mit natürlichem Licht gearbeitet werden, doch können schwankende Lichtverhältnisse die Weiterverarbeitung der Bilddaten erheblich beeinträchtigen. Daher werden in der Regel speziell auf die Aufgabe zugeschnittene Lichtquellen verwendet, um eine schattenfreie und gleichmäßige Beleuchtungssituation zu schaffen.

Objektiv

Bevor das vom Objekt reflektierte Licht den Kamerasensor erreicht, wird es durch ein Objektiv gebündelt und fokussiert, um ein scharfes Bild zu erhalten. Ein Objektiv besteht in der Regel aus einer Anordnung verschiedener Linsen, um Aberrationen und Verzerrungen zu minimieren. Eine typische Aberration ist z. B. die so genannte chromatische Aberration, bei der verschiedene Farben beim Durchgang durch das Objektiv unterschiedlich stark gebrochen

werden. Die Folge sind unscharfe Ränder und Farbsäume, die die Bildverarbeitung erheblich erschweren. Obwohl einige Fehler auch durch entsprechende Algorithmen kompensiert werden können, ist es immer von Vorteil, hochwertige Optiken zu verwenden. Da die Kosten für solche Objektive jedoch nicht unerheblich sind, sollte immer abgewogen werden, welche Qualität wirklich erforderlich ist.

Sensor der Kamera

Um das Licht in digitale Daten umzuwandeln, wird ein geeigneter Sensor benötigt. Je nach Aufgabenstellung kann hier bereits entschieden werden, ob ein Farb- oder ein Schwarz-Weiß-Sensor verwendet wird. Ein Schwarz-Weiß-Sensor ist nicht unbedingt billiger als ein Farbsensor, aber ein Farbsensor sollte nicht nur aus finanziellen Gründen verwendet werden. Bei gleicher Auflösung hat ein Schwarz-Weiß-Sensor eine bessere Kantengenauigkeit als ein Farbsensor, insbesondere wenn es um farbige Kanten geht. Um dies zu verstehen, wird hier kurz erklärt, wie ein Kamerasensor funktioniert.

Ein Kamerasensor besteht aus einer Matrix von lichtempfindlichen Halbleiterelementen (Pixel). Diese werden während eines Belichtungsvorgangs aufgeladen, und beim Auslesen wird die Ladungsmenge gemessen, die jedes einzelne Pixel aufgenommen hat. Eine hohe Ladung bedeutet eine hohe Lichtintensität und damit einen hellen Pixel im späteren Bild. Bei Schwarz-Weiß-Sensoren erfolgt die Messung unabhängig von der Farbe des einfallenden Lichts. Bei Farbsensoren wird ein Farbfilter vor die Sensorfelder geschaltet, der den Spektralbereich des einfallenden Lichts einschränkt. Da im späteren Bild die Farbanteile in Rot, Grün und Blau aufgeteilt sind, werden genau diese Farbanteile auch auf die Pixel verteilt. Die nebenstehende Abbildung zeigt 8x8 Sensorfelder, von denen 50% nur für grünes, 25% nur für rotes und 25% nur für blaues Licht sensitiv sind. Der höhere Anteil an grünen Lichtsensoren trägt der Tatsache Rechnung, dass unsere Augen im grünen Spektralbereich auch die höchste Empfindlichkeit haben. Diese Filterstruktur wird als Bayer-Filter bezeichnet. Um jedoch ein vollfarbiges Bild zu erhalten, müssen nun die jeweils verbleibenden Farbanteile jedes Pixels nachträglich interpoliert werden.

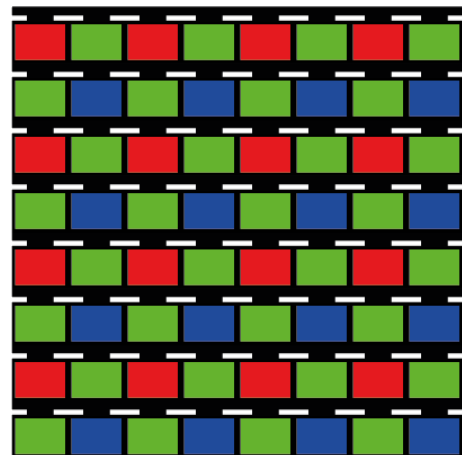


Abb. 16: Schema eines Farbsensors mit einem Bayer-Filter; die schwarzen Teile symbolisieren die nicht empfindlichen Chipbereiche, die für die Ausleseelektronik erforderlich sind. © PFI

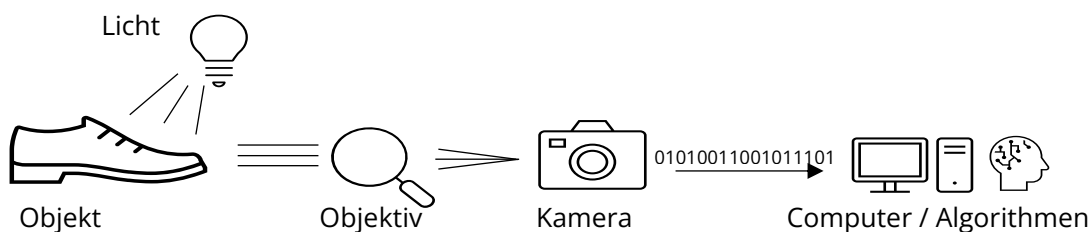
Es gibt viele verschiedene Algorithmen, die zu diesem Zweck verwendet werden können, aber sie werden in diesem Dokument nicht im Detail behandelt. Das Stichwort, um mehr Informationen darüber zu finden, lautet "Demosaiicing".

Mit diesem Wissen ist nun klar, welche Vorteile ein Schwarz-Weiß-Sensor gegenüber einem Farbsensor hat. Die Lichtempfindlichkeit ist höher, weil kein Licht durch Farbfilter verloren geht, und auch der nachfolgende Interpolationsprozess entfällt. Daher können diese Sensoren starke Farbkontraste auch bei schwächerem Licht genauer auflösen.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Bildsensoren ist die verfügbare Auflösung, und auch hier gilt: mehr ist nicht immer besser. Je mehr Pixel auf der gleichen Fläche vorhanden sind, desto kleiner wird der einzelne Sensor und desto weniger Licht kann er aufnehmen. Auch die zusätzlich zu den

lichtempfindlichen Flächen benötigte Elektronik, mit der die Pixel ausgelesen werden, reduziert die tatsächlich nutzbare Fläche und damit die Empfindlichkeit des gesamten Sensors. Des Weiteren gilt: Je höher die Auflösung, desto größer die Datenmenge und damit die für ihre Verarbeitung benötigte Rechenleistung. Bei der Wahl der Auflösung sollten Sie immer nach dem Prinzip verfahren: "So viel wie nötig, so wenig wie möglich."

Zuletzt hat auch die tatsächliche Größe des Sensors einen großen Einfluss auf die Lichtmenge, die er aufnehmen kann, und damit auf die allgemeine Empfindlichkeit. Größere Sensoren liefern rauschfreie Bilder in einem hohen Dynamikbereich. Diese sind jedoch per se teurer und erfordern auch eine teurere Optik, die auf die große Sensorfläche abgestimmt ist. Eine höhere Empfindlichkeit bedeutet kürzere Belichtungszeiten bei weniger Licht, was für Fotografen meist wichtiger ist. In industriellen Umgebungen ist es jedoch in der Regel einfacher und billiger, die Beleuchtung zu erhöhen, um die Arbeit der Sensoren zu erleichtern. In bestimmten Fällen, z. B. bei Fahrzeug-Crashtests, kann dies bedeuten, dass extreme Beleuchtungsstärken verwendet werden, um eine saubere Abbildung zu gewährleisten.



5.4 Bildverarbeitung

Nachdem die Bilder erfasst und in digitale Daten umgewandelt wurden, muss der Computer verstehen, was er sieht. Zu diesem Zweck wurden viele verschiedene Algorithmen entwickelt, die Aufgaben von der einfachen Farberkennung über Flächenberechnungen von eingehendem Rohleder bis hin zu komplexen Augmented-Reality-Anwendungen bewältigen. Es ist nicht möglich, in diesem Dokument auf alle Möglichkeiten einzugehen, daher werden im Folgenden nur einige Beispiele gezeigt.

Erkennung von Barcodes und QR-Codes

Eine seit langem genutzte Anwendung der Bilderkennung sind Barcodes oder QR-Codes. Spezielle Muster werden von einer Software erkannt und die darin enthaltenen Informationen dem Nutzer zur Verfügung gestellt. Je nach Umfang des Codes können dies einfache Seriennummern sein, aber auch komplexe Datensätze wie Visitenkarten oder ein Impfpass. Die Formatierung der einzelnen Codes kann unterschiedlich sein, aber aktuelle Handys mit der entsprechenden App erkennen sie sehr zuverlässig. Im industriellen Bereich finden sich häufig speziell für diese Aufgabe konzipierte Scanner, sei es an der Supermarktkasse, am Flughafen oder in Lagersystemen.

Farbkontrolle

Dies ist eine der einfachen Aufgaben, zu denen ein digitaler Algorithmus in der Lage ist. Die Farbe einer Probe wird mit einem Referenzwert aus einer Datenbank verglichen. Normalerweise bedeutet dies nur eine leichte Mittelwertbildung des Bildes in einem Bereich der Probe, um einen repräsentativen Farbwert zu erhalten. Liegt dieser Wert innerhalb der vorgegebenen Toleranzen, hat das Objekt die Prüfung bestanden. Obwohl dies auf der digitalen Ebene einfach ist, ist eine gut kontrollierbare Beleuchtungssituation der Schlüssel zu zuverlässigen Ergebnissen.

Flächenmessung

Für die Flächenmessung einer eingehenden Lederware ist es wichtig, einen guten Kontrast zwischen dem Objekt und dem Hintergrund zu erzielen. Außerdem ist es wichtig, die geometrische Situation von Kamera und Messfläche korrekt in die Software einzubeziehen, damit es nicht zu Fehlmessungen durch perspektivische Verzerrungen kommt. Ein Algorithmus erkennt nun die Fläche der Probe in Pixeln und errechnet dementsprechend die Fläche in den gewünschten Einheiten.

Fehlererkennung

Diese Aufgabe ist für die Bilderkennung etwas anspruchsvoller und es ist oft hilfreich, wenn mehrere Messungen (Bilder) unter verschiedenen Beleuchtungssituationen gemacht werden. Unter dem richtigen Licht können selbst kleine Dellen und Narben im Material Schatten werfen, die den jeweiligen Fehler viel deutlicher hervortreten lassen. Die Software kann nun die Bilddaten auf Unregelmäßigkeiten untersuchen und eventuelle Fehler mit Mustern aus einer Datenbank vergleichen. Auf diese Weise kann das eingehende Rohmaterial automatisch geprüft und in verschiedene Qualitätsklassen eingeteilt werden.

Positionserkennung

Die Erkennung der Orientierung und Position eines Bauteils ist eine häufige Aufgabe der Bilderkennung, insbesondere in Verbindung mit Robotern. Ist die Lage eines Bauteils richtig erkannt, kann es ein entsprechend programmierter Roboter zuverlässig greifen und dann wiederum in einer definierten Position einer Maschine zuführen. Bei starren Bauteilen ist dies heute gang und gäbe, aber das Greifen von biegeschlaffen Teilen ist für Roboter immer noch ein kniffliges Unterfangen.

Augmented reality

Das Ziel von Augmented-Reality-Anwendungen in der Industrie ist es, den Werker mit wichtigen Informationen zu unterstützen, die direkt in seinem Blickfeld eingeblendet werden. So können zum Beispiel Teilenummern und Bearbeitungshinweise entsprechend dem in der Hand gehaltenen Teil angezeigt werden, was dem Werker die Arbeit erleichtert und Fehlerquellen reduziert. In Kombination mit anderen intelligenten Verknüpfungen könnten z.B. bei der Entnahme eines Teils automatisch entsprechende Programme auf den verwendeten Maschinen eingestellt werden.

6 Anatomie und Biomechanik

6.1 Bewegungsapparat

Der Bewegungsapparat wird auch als muskuloskelettales System bezeichnet. Er besteht aus:

- dem Skelett,
- der Skelettmuskulatur,
- Sehnen,
- Bänder,
- Gelenke,
- Knorpel und
- anderer Verbindungselemente

Das Nervensystem (Gehirn und Nerven) sendet Signale zur Aktivierung der Muskeln und ermöglicht so willentliche Bewegungen.

Die Untersuchung der Struktur, Funktion und Bewegung der mechanischen Aspekte von Organismen wird als Biomechanik bezeichnet. Biomechanische Studien dienen dazu, ein umfassendes Verständnis der Bewegungen und der vom Körper erzeugten und auf ihn wirkenden Kräfte zu gewinnen. Schlüsselbereiche der Biomechanik sind: Dynamik, Kinematik, Kinetik und Statik.

6.2 Anatomie der Füße

Der Fuß ist Teil des Bewegungsapparates und trägt die Last beim Stehen und Bewegen. Er besitzt eine komplexe Struktur mit 28 Knochen, 33 Gelenken und vielen Muskeln, Sehnen und Bändern. Dabei ist er in der Lage, sich an Unebenheiten anzupassen und gleichzeitig eine ausreichende Steifigkeit aufzuweisen, um den Körper vorwärts zu bewegen. Die Fußanthropometrie wird von vielen Faktoren wie Alter, Geschlecht, Region, Mobilität und Gesundheit beeinflusst. Schuhe sollten so konzipiert sein, dass sie die natürliche Fußbewegung unterstützen und den Fuß nicht zu stark einschränken. Fußdeformitäten sind oft auf ungeeignetes Schuhwerk in der frühen Entwicklungsphase zurückzuführen. Probleme wie Platt- und Schieffüße treten im Erwachsenenalter häufig aufgrund von falschem Schuhwerk, unzureichender Bewegung und ungesunder Lebensweise auf.

6.3 Gangart-Zyklen

Gehen und Laufen sind dynamische, periodische Bewegungen, bei denen Kräfte entstehen, die vom Bewegungsapparat aufgenommen werden müssen. Während der verschiedenen Phasen des Gangzyklus variiert die Belastung und Funktion des Fußes. Während des ersten Kontakts muss der Aufprall gedämpft werden, die Last muss während der Standzeit getragen werden und während des Abstoßens muss der Körper nach vorne getrieben werden. Die Belastung übersteigt das Körpergewicht und kann beim Laufen bis zum 2,8-fachen des Körpergewichts betragen.

6.4 Messverfahren

Es gibt eine Reihe von statischen und dynamischen Messmethoden zur Untersuchung der Bewegung, der Druckverteilung und der im Laufe des Gangzyklus auftretenden Kräfte. Die gemessenen Variablen können zeitlich, kinematisch (Position, Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung), kinetisch (Kraft, Energie, Arbeit, Leistung) oder im Zusammenhang mit der Muskelaktivität und dem Stoffwechsel gemessen werden.

Zur Messausrüstung gehören Kraftmessplatten, Hochgeschwindigkeitskameras, Drucksensormatten, Drucksensoreinlagen, EMG-Sensoren, IMU-Sensoren, GPS-Sensoren, Gasanalysatoren

7 Sensoren

7.1 Was kann gemessen werden?

Jede physikalische Eigenschaft, die von einem Menschen wahrgenommen werden kann, ist auch mit einem Sensor messbar. Außerdem sind die von elektronischen Sensoren gelieferten Informationen unvoreingenommen und objektiv. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl anderer physikalischer Eigenschaften, für die der Mensch keinen Sinn hat, wie z. B. Radiowellen. Eigenschaften der realen Welt, die man messen möchte, können sein:

- Entfernung
- Geschwindigkeit
- Beschleunigung
- Zeit
- Druck
- Temperatur
- Magnetische Felder
- Helligkeit
- Kraft
- etc.

7.2 Wie können Sensoren messen?

Entfernung

Eine Entfernung kann auf verschiedene Weise gemessen werden. Eine gängige Methode für recht präzise Abstandssensoren basiert auf dem Prinzip der Triangulation. Ein Laser projiziert einen Punkt auf das Objekt und eine zum Laser versetzte "Kamera" beobachtet die Position dieses Punktes, wie in Abbildung 17 zu sehen ist. Eine andere Methode sind "Time-of-Flight"-Sensoren, die die Zeit für ein Echo eines zuvor gesendeten akustischen oder elektromagnetischen Signals messen.

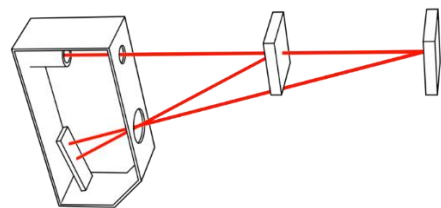


Abb. 17: Triangulations-basierter Abstandssensor © PFI

Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit ist die Strecke über die Zeit und kann daher anhand der Zeit gemessen werden, die für eine bekannte Strecke benötigt wird. Die Geschwindigkeit eines Autos lässt sich beispielsweise anhand des Radumfangs und der Zeit, die das Rad für eine Umdrehung benötigt, berechnen. Eine Geschwindigkeit wird immer relativ zu einem Bezugssystem gemessen.

Beschleunigung

Diese kann entweder in Form der Zeit gemessen werden, die ein Objekt benötigt, um von einer Geschwindigkeit auf eine andere zu beschleunigen, oder in Form der Kraft, die eine bekannte Masse einer Geschwindigkeitsänderung entgegensetzt. Vor allem die zweite Methode ist vorteilhaft, da ein Sensor keine externe Referenz benötigt, um eine Beschleunigung zu messen. Beschleunigungssensoren sind z. B. in Handys eingebaut und werden oft verwendet, um die Ausrichtung des Geräts über die Schwerkraft zu bestimmen. Eine frei schwingende Masse wird durch mehrere Federelemente in einen Rahmen eingespannt. Wenn der äußere Rahmen beschleunigt wird, werden die Federn aufgrund der Trägheit der zentralen Masse verformt. Diese Verformung wird erfasst und über eine entsprechende Auswerteelektronik in eine Beschleunigung umgewandelt. Aktuelle Beschleunigungssensoren in Mikrobauweise sind nicht größer als ein Stecknadelkopf.

Gyroskop

Ähnlich wie Beschleunigungssensoren können Gyroskope Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit erkennen. Auch sie benötigen keine externe Referenz und werden in vergleichbaren Ausführungen wie Beschleunigungssensoren angeboten.

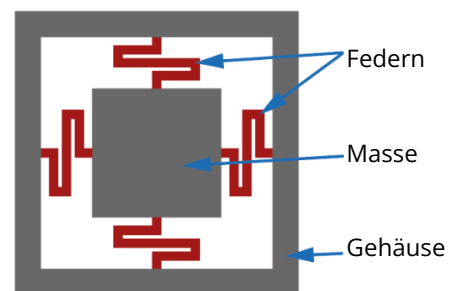


Abb. 18: schematische Darstellung eines Beschleunigungssensors © PFI

Temperatur

Es gibt viele Möglichkeiten, eine Temperatur zu messen. Eine kostengünstige und zuverlässige Art in der Elektronikentwicklung nutzt weitgehend den temperaturabhängigen Widerstand verschiedener Materialien, um Rückschlüsse auf die Umgebungstemperatur zu ziehen.

Magnetische Felder

Magnetische Sensoren werden meist eingesetzt, um das geomagnetische Feld zu erfassen und daraus die Orientierung abzuleiten. Da ein elektrischer Strom, der in Verbindung mit einem Magnetfeld durch einen Leiter fließt, eine Kraft auf diesen Leiter ausübt, ist es auch hier möglich, hochintegrierte, kostengünstige elektronische Komponenten zu entwerfen.

Druck / Kraft

Die Druck- oder Krafterfassung ist ein grundlegendes Instrument in der Biomechanik. Es gibt verschiedene physikalische Eigenschaften, die gemessen werden können, aber die meisten Sensoren haben eine verformbare Schicht zwischen zwei leitenden Schichten. Ein Beispiel: Wenn die Schicht isolierend ist, ergeben die beiden anderen einen Kondensator, dessen Kapazität vom Abstand zwischen den beiden äußeren Schichten abhängt. Diese Kapazität wird gemessen und in den ausgeübten Druck umgewandelt; daher nennt man diesen Sensortyp einen kapazitiven Sensor.

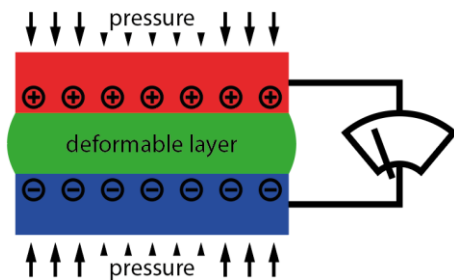


Abb. 19: Das Prinzip eines kapazitiven Sensors © PFI

7.3 Trägheitsmessgerät (IMU)

Eine IMU ist kein einzelner Sensor, sondern eine Kombination aus Beschleunigungsmesser, Gyroskop und Magnetsensor in einem. Auch die Auswerteeinheit und die digitalen Schnittstellen sind oft in einem Gehäuse zusammengefasst, so dass das Bauteil leicht in bestehende Schaltungen integriert werden kann. Diese Einheit kann nun ihre Ausrichtung im Raum bestimmen und auch Änderungen ihrer Position erkennen. Die Ausrichtung ist sehr zuverlässig, da die Drehung immer wieder mit der magnetischen Ausrichtung im Erdmagnetfeld und der Richtung der Schwerkraft verglichen werden kann. Die Position kann jedoch nur anhand der Beschleunigungen geschätzt werden, woraus eine Geschwindigkeit berechnet und daraus wiederum die räumliche Abweichung ermittelt wird. Da ein Sensor immer eine gewisse Abweichung und Toleranz hat, führt dies allmählich zu einem immer größer werdenden Fehler, der ohne absolute Positionierung nicht kompensiert werden kann. Beispiel: Ein Sensor liegt still auf einem Tisch. Eigentlich sollte er abgesehen von der Erdbeschleunigung (Gravitation) keine Bewegung zeigen. Geringste Fehler durch Fertigungstoleranzen führen jedoch zu einem minimalen Beschleunigungswert. Das bedeutet, dass die Auswerteeinheit eine immer höhere Geschwindigkeit annimmt, was zu einer immer schnelleren Positionsverschiebung führt. Irgendwann glaubt das Gerät, es bewege sich mit Schallgeschwindigkeit oder schneller durch den Raum, obwohl es sich gar nicht bewegt hat. Um dies zu kompensieren, ist eine Form der Positionsreferenz notwendig, wie z. B. ein GPS-Signal oder vielleicht die Stärke von Wi-Fi-Signalen in der Nähe.

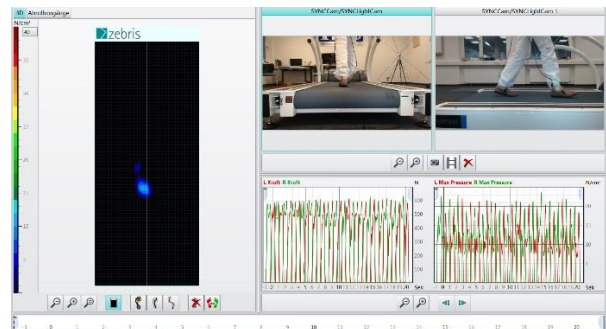


Abb. 20: Softwareschnittstelle eines mit Sensoren ausgestatteten Laufbands; links: Übersicht über die Laufbandoberfläche; rechts oben: Kameraansicht; rechts unten: Visualisierung der erfassten Daten. © PFI

7.4 Lokale Sensoren

Fest installierte Sensoren sind mit einer nicht mobilen Messstation, z. B. einem Laufband, verbunden. Sie haben den Vorteil, dass sie in der Regel sofort einsatzbereit sind und eine Kalibrierung nur bei Problemen mit der Messung durchgeführt werden muss.

7.5 Mobile Sensoren

Mobile Sensoren werden vom Benutzer mitgeführt und zeichnen die Daten zur späteren Untersuchung auf einer SD-Karte auf oder übertragen die Informationen über eine Funkverbindung wie Wi-Fi oder Bluetooth. Diese Sensoren müssen direkt am Benutzer angebracht werden und erfordern in der Regel eine Art Kalibrierungsprozess. Diese Sensoren sind zum Beispiel:

- Trägheitsmessgeräte (IMU)
- Elektromyographie-Sensoren (EMG)
- Druck- oder Kraftsensoren

7.6 Einsatz von Sensoren in Schuhen

Der Einsatz von Sensoren in Schuhen bietet ein breites Spektrum an Möglichkeiten, vom einfachen Schrittzähler im Alltag bis hin zur biometrischen Ganganalyse in Wissenschaft und Forschung. Auch die Medizin kann von Daten über das Geh- und Laufverhalten von Patienten profitieren und Behandlungsmethoden besser an die jeweilige Situation anpassen. Bei all dem darf aber die Entsorgung und das Recycling der elektronischen Bauteile in Schuhen und Kleidung nicht vernachlässigt werden.

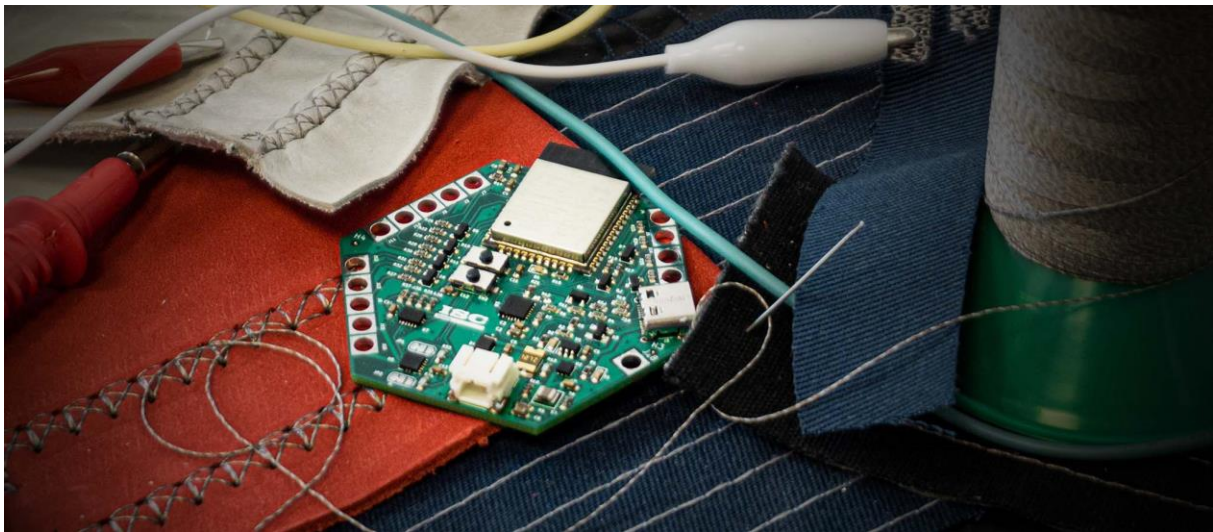


Abb. 21: Basisplatine für intelligente Textilien © PFI

8 Abbildungen

Abb. 1: Tätigkeitsbereiche in DIA-CVET und ihre Beziehung zum Produktionsprozess.....	4
Abb. 2: 6-Achsen-Roboter mit Greifer © PFI	5
Abb. 3: Scara Roboter © PFI	7
Abb. 4: Delta Roboter © PFI.....	8
Abb. 5: CAM-System DEScom von DESMA; Programmierung eines Schrubbyklus auf Basis von 3D-CAD-Daten; Visualisierung der Werkzeugbahn und -orientierung. (Bild von DESMA).....	9
Abb. 6: Hochautomatisierte Spritzgießanlage von DESMA (Bilder von DESMA)	10
Abb. 7: links: subtraktiver Prozess (dunkelblau: gewünschter Teil, hellblau: entferntes Material) rechts: additiver Prozess (dunkelblau: Basisschicht, grün: hinzugefügte Schichten) © PFI	11
Abb. 8: Schaltplan eines SLA-Druckers mit LCD-Lichtquelle © PFI.....	11
Abb. 9: Schema eines FDM-Druckers © PFI.....	12
Abb. 10: Schema eines SLS/SLM-Systems © PFI	12
Abb. 11: Schematische Darstellung eines Materialdruckers © PFI	13
Abb. 12: Schema eines Bindemitteldruckers © PFI.....	13
Abb. 13: Slicer für einen FDM-basierten Druck. 1) platziertes Teil; 2) Vorschau der ersten Schicht; 3) Mitte des Drucks mit sichtbarer Füllung (orange); 4) fertiges Teil © PFI	14
Abb. 14: RGB-Farbwerte der verschiedenen Pixel © PFI	16
Abb. 15: additives Mischen von Farben © PFI.....	16
Abb. 16: Schema eines Farbsensors mit einem Bayer-Filter; die schwarzen Teile symbolisieren die nicht empfindlichen Chipbereiche, die für die Ausleseelektronik erforderlich sind. © PFI	17
Abb. 17: Triangulations-basierter Abstandssensor © PFI	21
Abb. 18: schematische Darstellung eines Beschleunigungssensors © PFI.....	22
Abb. 19: Das Prinzip eines kapazitiven Sensors © PFI	23
Abb. 20: Softwareschnittstelle eines mit Sensoren ausgestatteten Laufbands; links: Übersicht über die Laufbandoberfläche; rechts oben: Kameraansicht; rechts unten: Visualisierung der erfassten Daten. © PFI.....	23
Abb. 21: Basisplatte für intelligente Textilien © PFI	24