



**HOCHSCHULE
HANNOVER**
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS
–
*Fakultät II
Maschinenbau und
Bioverfahrenstechnik*

2024

BMEL Projekt DiKoRo Abschlussbericht



Matthias Weiß

Hochschule Hannover

31.5.2024

Verbundprojekt: Digitales Prozessmodell am Beispiel Kollaborativer Roboter für individualisierte Lebensmittel in der Produktion von KMU (DiKoRo)
Förderkennzeichen: 281A504F19
Laufzeit: 01.12.2020 – 30.11.2023

Teil I Kurzbericht (max. 2 Seiten) Darstellung des Projektergebnisses

Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie den wissenschaftlichen und technischen Stand

Projektziel: Entwicklung eines digitalen Prozessmodells am Beispiel Kollaborativer Roboter für individualisierte Lebensmittel in der Produktion von KMU als Paradigma für die verantwortungsvolle und schrittweise Digitale Transformation und ein gemeinsames, interdisziplinäres Vorgehen unter zeitlicher und vollständiger Einbeziehung der Unternehmen und Personen, unter Beibehaltung des wertvollen handwerklichen Charakters der Produktion in den KMU der Ernährungswirtschaft.

Im Projektfokus stehen paradigmatisch die, bisher handwerklich-manuell erfolgende, individuelle Ausstattung und Dekoration von Back- und Süßwaren. Diese oft ausgesprochen monotonen, manuellen Tätigkeiten sind geprägt durch hohe gesundheitliche Belastungen, was die ohnehin stark absinkende Verfügbarkeit geeigneten Personals weiter beeinträchtigt. Der Bedarf an einer Automatisierung beispielsweise der Dekoration von Lebkuchen und auch der (Aus-) Formung von Marzipanmedaillons ist allgemein anerkannt. Publiziert werden diesbezügliche Konzepte (oft als Messemodelle zur Demonstration der Leistungsfähigkeit von Robotern, Pumpen und Bilderkennung) wiederholt. Am Markt verfügbar ist aber nichts allgemein Übertragbares. Dies spricht keinesfalls gegen die im Mittelpunkt der Publikationen stehenden Komponenten und vorhandenen exemplarischen Lösungen, aber ist auf das Fehlen eines übergreifenden Prozessmodells und dafür notwendigen Know-hows zurück zu führen. Diese Einschätzung ist nach wie vor gültig.

Ablauf des Vorhabens

Grundsätzlich wurden alle geplanten Arbeitsschritte sehr gut bis in Ausnahmen hinreichend absolviert. Letztere Einschränkung resultiert aus der unerwarteten und anhaltenden Pandemiesituation im Projektzeitraum. So wurden, insbesondere Corona bedingt, auch zwei kostenneutrale Verlängerungen notwendig und durch kostenbewusstes Projektmanagement und die intensive Unterstützung der industriellen Partner sowie das Entgegenkommen des Projektträgers auch möglich. Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang zwei, insbesondere zeitlich extrem dominierende, Faktoren:

1. Der erhebliche experimentelle Aufwand wurde erschwert durch die zeitweilig vollständige Einschränkung der Zugänglichkeit von zu analysierenden Produktionsanlagen und selbst der eigenen Labors der Hochschule sowie
2. die fehlende Verfügbarkeit von Hardwarekomponenten (insbesondere AD/DA Wandler zur Synchronisation von Roboterbewegung und Volumenstrom der Dosierung) über fast zwei Jahre.

Die zweite kostenneutrale Verlängerung ermöglichte andererseits aber auch die umfangreiche und so nicht geplante Ausdehnung der Untersuchungen auf zwei weitere grundsätzliche Verfahren. Basierend auf im Projekt erkannten Grenzen des 3D Drucks von hochpastösen fasrigen Massen (wie Marzipan) erfolgte die erstmalige Anwendung des prototypischen Digitalen Zwillings zur automatisierten Erstellung von gefrästen und von gedruckten Kunststoffformen sowie zur direkten abtragenden bzw. abrasiven Bearbeitung von Lebensmittelrohlingen. Diese Untersuchungen konnten ein hohes Verbes-

serungspotential bezüglich Abbildungsqualität, Rezepturkonstanz und insbesondere der die Wirtschaftlichkeit bestimmenden Produktionszeit/je Stück gegenüber dem robotergestützten Lebensmittel 3D Druck aufzeigen.

Neben den unmittelbar, also auch förder technisch partizipierenden industriellen Projektpartnern, konnte temporär auch das im Bereich Robotik in der Lebensmittel- und Verpackungsbranche ausgesprochen renommierte Unternehmen Gehard Schubert GmbH Crailsheim für eine Projektbegleitung gewonnen werden. Aus dieser Unterstützung resultieren wichtige Erkenntnisse zur automatisierten Bilderkennung im Lebensmittelbereich, aber auch zu den technischen und wirtschaftlichen Einsatzgrenzen der kollaborativen Robotik.

Wesentliche Ergebnisse

Im Ergebnis liegt für die robotergestützte individuelle Ausstattung und Dekoration von Back- und Süßwaren erstmalig eine umfassende und übertragbare Systematik aller relevanten lebensmitteltechnologischen, maschinentechnischen, betriebsorganisatorischen und betriebswirtschaftlichen Parameterbereiche einschließlich aller zugehörigen informationstechnischen Anforderungen vor.

An den, darauf beruhenden, prototypischen digitale Zwilling konnten ein Scara Roboter sowie ein Igus Dreiachssystem (beide im Zusammenhang mit einer Excenterschneckenpumpe) für die Untersuchungen des Lebensmittel 3 Drucks sowie eine laborgerechte CNC-Fräse und ein 3D Kunststoffdrucker (für die alternative Erstellung von Formen) erfolgreich angekoppelt und experimentell genutzt werden.

Projektseitig wurde der TRL 4 (Technology Ready Level 4 – Technology validated in Labor) erreicht. Seit Projektende 11/2023 laufen weitergehende Entwicklungen zwischen den Projektpartnern, Niederegger und der Hochschule Hannover, welche von der SimPlan AG begleitet werden. Ziel ist der TRL 5 für das Beispiel der automatisierten Ausformung von Marzipanmedaillons bis Ende des 2. Quartales 2024. Die weitere konkrete, praktische Realisierung hängt davon ab, wie die Industrie die Ergebnisse aufgreift. Dabei sind zunächst weniger die Lebensmittelproduzenten als vielmehr die Maschinenbauer und Systemhäuser der Robotik und Automatisierung gefordert.

Durchaus als wertvoller, so aber nicht geplanter und voraussehbarer Erkenntnisgewinn ist die Einschätzung zu bewerten, dass eine unmittelbare kollaborative Zusammenarbeit zwischen Bediener und Roboter im identischen Arbeitsraum sicherheitstechnisch und kostenseitig für den betrachteten Einsatzbereich nicht opportun ist. Genau dies wird auch von parallelen Entwicklungen in anderen Branchen bestätigt. Als erfolgversprechende Brückentechnologie erweist sich aber die direkte manuelle Ansteuerung des Roboter- und Dosiersystems über einen Gamecontroller und hat gegenüber einer Teach-In Nutzung nachweisliche qualitative (Reaktionsfähigkeit auf variierende Untergründe und Viskositätschwankungen der aufzutragenden Masse) und gegenüber der Vollautomatisierung mit Bilderkennung und geschlossenen Robotersystemen bei kleineren Stückzahlen erkennbare wirtschaftliche Vorteile. Dieser technologische Weg wird über das Projekt hinaus durch Entwicklungsarbeiten an der Hochschule fortgesetzt.

Die spezifischen Zwischen- und Endergebnisse wurden und werden transparent durch zahlreiche Vorträge, Filme und Poster für Konferenzen (der BLE Bonn und der Agrathaer GmbH, diverse Formate der DLG Frankfurt im In- und Ausland, des NaGeB Bremen, der VVD TU Dresden, ...) und Messen wie u.a. der Anuga FoodTec 2022 und 2024, die Fachpack Nürnberg und die Interpack Düsseldorf publiziert.

1 Inhalt

2	Laufzeit 12/2020 - 11/2023	3
3	Danksagung	3
4	Einleitung.....	3
5	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	5
5.1	Projektteam	5
5.1.1	HS Hannover	5
5.1.2	SimPlan AG (Konsistorialführer)	5
5.1.3	J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck.....	6
5.1.4	Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen	6
5.1.5	Ingenieurbüro Rolf Peters Bad Zwischenahn.....	6
5.1.6	Lupeg GmbH Pegnitz	6
5.2	Material und Systeme.....	7
5.2.1	Technische Systeme.....	7
5.2.2	Software.....	9
5.2.3	Material	9
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten.....	10
6.1	Produktauswahl.....	10
6.1.1	Produktbereich A: Niedrigviskose Massen zum Bilden von Freiformstrukturen.....	10
6.1.2	Produktbereich B: Hochviskose Massen für komplexe Geometrien	11
6.2	Analysen bei den lebensmittelproduzierenden Partnern	12
6.2.1	Lebkuchenproduktion und -dekoration Heinrich Schulze Ladencafé GmbH.....	12
6.2.2	Tortenproduktion J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck.....	17
6.3	Produktbereich A: Niedrigviskose Massen	18
6.3.1	Produkt- und Prozessparameter	18
6.3.2	Kinematisches Konzept und Bewegungssteuerung.....	23
6.3.3	Lineare Strangbildung.....	25
6.3.4	Alternative 1: 3D Druck Kartoffelpüree	26
6.3.5	3D Druck Laugengebäck	26
6.3.6	Hygienische und Mikrobiologische Aspekte.....	27
6.4	Produktbereich B: Hochviskose Massen.....	32
6.4.1	Übersicht	32
6.4.2	3D Druck Marzipan.....	33
6.4.3	Formenherstellung (Fräsen und 3D Druck)	34
6.4.4	Extrudieren in 3D Form	36
6.4.5	3D Direktfräsen Marzipan.....	37

6.5	Kollaborative Robotik	38
6.6	Digitaler Zwilling	39
6.6.1	Web Solution – Simulation in the Cloud.....	39
6.6.2	Digitale Zwillinge als plattformübergreifende Entwicklung	40
6.6.3	Schnittstellen und Transformationsebene.....	41
6.6.4	Bilderkennung.....	41
6.6.5	Produktionsstrategien: Layout- und Bedienkonzepte	43
6.6.6	Betriebswirtschaftliche Aspekte	45
6.6.7	DiKoRo – Gesamtkonzept / Digitaler Zwilling / Assistenzsystem.....	46
7	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	47
8	Planungen für die Zukunft - im Sinne des fortg. Verwertungsplans.....	48
8.1	Hochschule Hannover.....	48
8.2	SimPlan AG Hanau	49
8.3	J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck.....	49
8.4	Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen	49
8.5	Ingenieurbüro Rolf Peters Bad Zwischenahn.....	50
8.6	Lupeg GmbH Pegnitz	50
9	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	50
10	Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF.....	53
11	Abbildungsverzeichnis	55

2 Laufzeit 12/2020 - 11/2023

Lt. Antrag: 31.12.2020 – 30.11.2022 (24 Monate)

1. Verlängerung: 01.12.2022 – 31.05.2023
2. Verlängerung: 31.05.2023 – 30.11.2023

Gravierende Beeinträchtigungen durch

☛ 2020 /2021 Corona

☛ IV/2023 Gesamtes IT-System/Server einschließlich Telefon der Hochschule durch Hackerangriff blockiert (einige Funktionen und Serverbereiche sind auch 5/24 noch nicht wieder verfügbar)

3 Danksagung

Rückblickend auf 36 Monate gemeinsamer Projektarbeit ist es mir ein ganz persönliches Anliegen meinen Dank zum Ausdruck zu bringen an den Fördermittelgeber BMEL für die Zuwendung und das damit ausgedrückte Vertrauen und für die erfolgsentscheidende Unterstützung durch den Projektträger BLE insbesondere Herrn Hebel sowie durch die leitenden Stellen der Hochschule ganz besonders an Frau Schaldach und Herrn Ohloff.

Gleichermaßen danke ich allen industriellen Projektpartnern und insbesondere der SimPlan AG für die Konsistorialführung sowie allen unmittelbar aktiven Teammitgliedern des Projektes und den Kolleginnen und Kollegen der Hochschule Hannover für wertvolle Anregungen, fachliche und organisatorische Unterstützung und das freundliche Verständnis u.a. bei Termindruck und -überschneidungen.

Matthias Weiß Projektleiter HS Hannover

4 Einleitung

Ziel ist die Entwicklung eines digitalen Prozessmodells am Beispiel Kollaborativer Roboter für individualisierte Lebensmittel in der Produktion von KMU als Paradigma für die verantwortungsvolle und schrittweise Digitale Transformation und ein gemeinsames, interdisziplinäres Vorgehen unter rechtzeitiger und vollständiger Einbeziehung der Unternehmen und Personen, unter Beibehaltung des wertvollen handwerklichen Charakters der Produktion in den KMU der Ernährungswirtschaft.

Im Projektfokus stehen paradigmatisch die, bisher handwerklich-manuell erfolgende, individuelle Ausstattung und Dekoration von Back- und Süßwaren. Diese oft ausgesprochen monotonen, manuellen Tätigkeiten sind geprägt durch hohe gesundheitliche Belastungen, was die ohnehin stark absinkende Verfügbarkeit geeigneten Personals weiter beeinträchtigt. Der Bedarf an einer Automatisierung beispielsweise der Dekoration von Lebkuchen und auch der (Aus-) Formung von Marzipanmedaillons ist allgemein anerkannt. Publiziert werden diesbezügliche Konzepte (oft als Messemockups zur Demonstration der Leistungsfähigkeit von Robotern, Pumpen und Bilderkennung) wiederholt. Am Markt verfügbar ist aber nichts allgemein Übertragbares. Dies spricht keinesfalls gegen die im Mittelpunkt der Publikationen stehenden Komponenten und vorhandenen exemplarischen Lösungen, aber ist auf das Fehlen eines übergreifenden Prozessmodells und dafür notwendigen Know-hows zurück zu führen. Diese Einschätzung ist nach wie vor gültig.

Für das Projekt DiKoRo wurden zwei Produktbereiche ausgewählt:

- A) **Niedrigviskose Massen** zum Bilden von Freiformstrukturen wie das Royal-Icing z.B. zur Dekoration von Lebkuchen mit linienförmigen Strukturen
- B) **Hochviskose Massen** zum Ausformen von komplexen Geometrien und bildlicher Darstellung

Im Ergebnis liegt für die robotergestützte individuelle Ausstattung von Back- und Süßwaren eine umfassende und übertragbare Systematik aller relevanten Parameterbereiche einschließlich aller zugehörigen informationstechnischen Anforderungen vor.

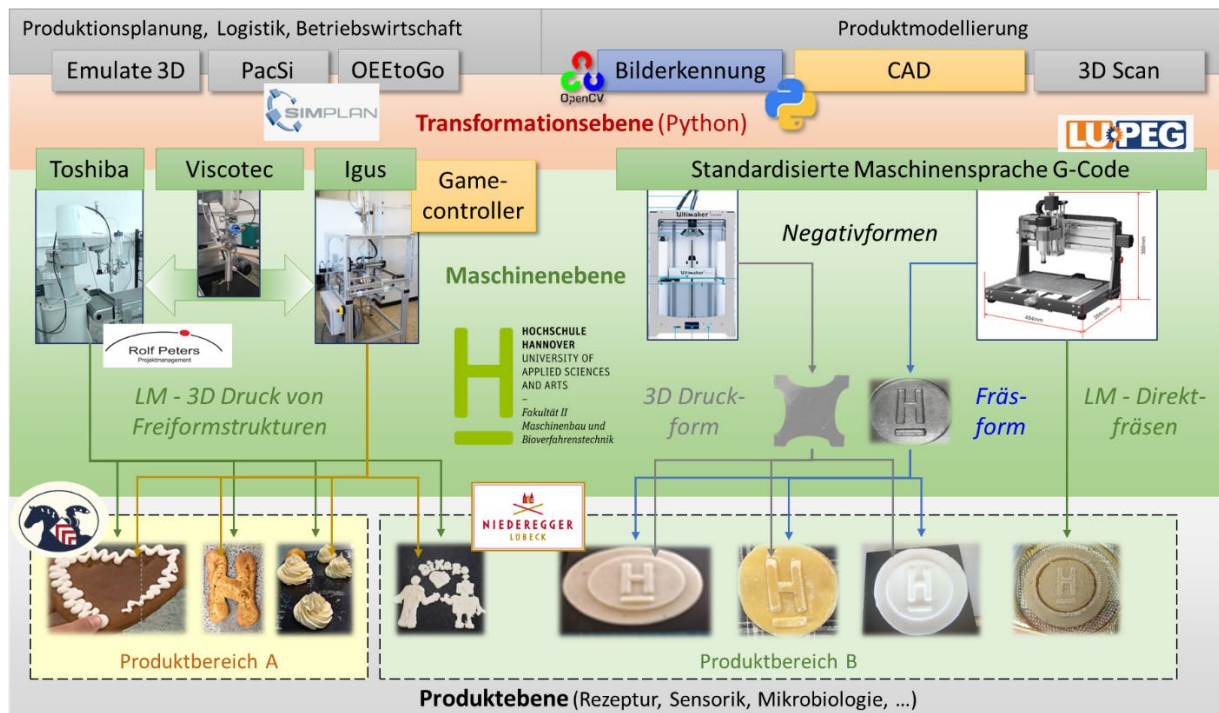


Abbildung 4-1: DiKoRo - Schematische Übersicht

An den, darauf beruhenden, prototypischen digitale Zwilling konnten ein Scara Roboter sowie ein Igus Portalsystem (beide im Zusammenhang mit einer Excenterschneckenpumpe) für die Untersuchungen des Lebensmittel 3 Drucks sowie eine laborgerechte CNC-Fräse und ein 3D Kunststoffdrucker (für die alternative Erstellung von Formen) erfolgreich angekoppelt und experimentell genutzt werden.

Projektseitig wurde der TRL 4 (Technology Ready Level 4 – Technology validated in Labor) erreicht. Seit Projektende 11/2023 laufen weitergehende Entwicklungen zwischen den Projektpartnern, J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck und der Hochschule Hannover, welche von der SimPlan AG Hanau begleitet werden. Ziel ist der TRL 5 für das Beispiel der automatisierten Ausformung von Marzipanmedaillons bis Ende des 2. Quartales 2024. Die weitere konkrete, praktische Realisierung hängt davon ab, wie die Industrie die Ergebnisse aufgreift. Dabei sind zunächst weniger die Lebensmittelproduzenten als vielmehr die Maschinenbauer und Systemhäuser der Robotik und Automatisierung gefordert.

Durchaus als wertvoller, so aber nicht geplanter und voraussehbarer Erkenntnisgewinn ist die Einschätzung zu bewerten, dass eine unmittelbare kollaborative Zusammenarbeit zwischen Bediener und Roboter im identischen Arbeitsraum sicherheitstechnisch und kostenseitig für den betrachteten Einsatzbereich nicht opportun ist. Als erfolgversprechende Brückentechnologie erweist sich aber die direkte manuelle Ansteuerung des Roboter- und Dosiersystems über einen Gamecontroller und hat gegenüber einer Teach-In Nutzung nachweisliche qualitative (Reaktionsfähigkeit auf variierende Untergründe und Viskositätsschwankungen der aufzutragenden Masse) und gegenüber der Vollautomatisierung mit Bilderkennung und geschlossenen Robotersystemen bei kleineren Stückzahlen erkennbare wirtschaftliche Vorteile. Dieser technologische Weg wird über das Projekt hinaus durch Entwicklungsarbeiten an der Hochschule fortgesetzt.

5 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zu den wichtigsten Kosten der HS Hannover gehören:

Personalkosten (vgl. Abschnitt 5.1 Projektteam)

- 0812 Beschäftigte E12 – E15: 82.076,73 €
- 0817 Beschäftigte E01 – E11: 84.251,22 €
- 0822 sonstige Beschäftigte: 4.061,28 €

Technische Kosten (vgl. Abschnitte Abschnitt 5.2 Material und Systeme)

- 0843 sonstige allg. Verwalt.: 2.111,23 €
- 0850 Gegenstände: 10.925,79 €

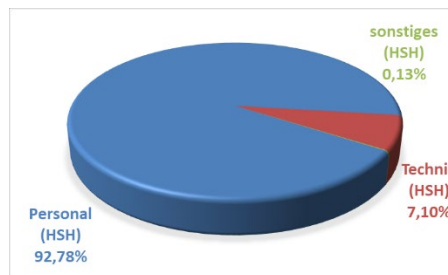


Abbildung 5-1: Kostenanteile

5.1 Projektteam

5.1.1 HS Hannover

- ✓ 12/2020 – 11/2022 Herr Trusheim Wissenschaftlicher Projektmitarbeiter
- ✓ 12/2020 – 10/2022 Herr Möllers Wissenschaftlicher Projektmitarbeiter
- ✓ 12/2020 – 07/2022 Frau Sylvia Knebelsberger Technische Mitarbeiterin (Haushaltsstelle/SQM)
- ✓ 12/2020 – 09/2022 Frau Jessica To Technische Mitarbeiterin (Haushaltsstelle/SQM)
- ✓ 09/2020 – 02/2021 Herr Reiko Wendorf Projektarbeit (Fa. Heinrich Schulze Ladencafé GmbH)
- ✓ 03/2021 – 07/2021 Herr Reiko Wendorf Bachelorarbeit (Fa. Heinrich Schulze Ladencafé GmbH)
- ✓ 03/2021 – 07/2021 Frau Tomke Meyer-Ebrecht Projektarbeit LMV (J. G. Niederegger GmbH)
- ✓ 03/2021 – 07/2021 Frau Antonia Meyer Projektarbeit LMV (J. G. Niederegger GmbH & Co. KG)
- ✓ 03/2021 – 07/2021 Frau Sophie Heinemann Masterarbeit (J. G. Niederegger GmbH & Co. KG)
- ✓ 03/2021 – 05/2021 Herr Jan Haas Wissenschaftliche Hilfskraft
- ✓ 09/2021 – 09/2022 Herr Jan Haas Wissenschaftlicher Projektmitarbeiter
- ✓ 03/2022 – 02/2023 7 Masterstudierende der LV „Interdisziplinäre Projektarbeit“
- ✓ 03/2023 – 07/2023 5 Bachelorstudierende der LV „Projekt Lebensmittelverpackung“
- ✓ 09/2023 – 11/2023 Herr Jan Haas Wissenschaftliche Hilfskraft
- ✓ 09/2023 – 11/2023 Herr Reiko Wendorf Masterarbeit (J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck)
- ✓ 09/2023 – 11/2023 Herr Reiko Wendorf Wissenschaftlicher Projektmitarbeiter
- ✓ 07/2023 – 11/2023 Herr Dr. Dirk Hoffman Wissenschaftlicher Mitarbeiter (SQM)
- ✓ 12/2020 – 11/2023 Herr Prof. Dr.-Ing. Matthias Weiß Projektleiter Hochschule Hannover

5.1.2 SimPlan AG (Konsistorialführer)

- ✓ 12/2020 – 11/2023 Herr Karsten Beyer, Geschäftsstellenleiter / Gesamtprojektleiter
- ✓ 12/2020 – 03/2023 Herr Prof. Dr. Sven Spieckermann, Projektleitung
- ✓ 12/2020 – 11/2023 Herr Joachim Kleinert, Softwareentwickler Simulation, Projektmitarbeiter
- ✓ 05/2022 – 03/2023 Herr Lukas Joachim Schmidt, Consultant Simulation, Projektmitarbeiter
- ✓ 06/2021 – 03/2022 Frau Beate Schebitz, Consultant Simulation, Projektmitarbeiterin

- ✓ 12/2020 – 03/2021 Herr Steve Oltzcher, Werkstudent Simulation, Projektmitarbeiter
- ✓ 11/2021 – 12/2021 Herr Stephan Staube, r Geschäftsstellenleiter, Projektmitarbeiter
- ✓ 11/2021 – 03/2022 Herr Alex Müller, Softwareentwickler Simulation, Projektmitarbeiter
- ✓ 04/2021 Herr Friedrich Rutzen Consultant, Simulation, Projektmitarbeiter
- ✓ 12/2022 - 02/2023 Herr Omid Amiri Consultant Simulation, Projektmitarbeiter
- ✓ 01/2023 – 11/2023 Herr Jan Haas Werksstudent, Projektmitarbeiter

5.1.3 J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck

- ✓ 2021 Frau Sophie Heinemann Masterstudent
- ✓ ab 8/2021 Frau Sophie Heinemann Mitarbeiterin
- ✓ 2023 Herr Reiko Wendorf Masterstudent
- ✓ 12/2020 – 11/2023 Herr Kai Röblitz Werkleiter

5.1.4 Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen

- ✓ 2020 Herr Reiko Wendorf Projektarbeit
- ✓ 2021 Herr Reiko Wendorf Bachelorstudent
- ✓ 12/2020 – 11/2023 Herr Arne Knaust Geschäftsführer

5.1.5 Ingenieurbüro Rolf Peters Bad Zwischenahn

- ✓ 12/2020 – 11/2023 Herr Rolf Peters Geschäftsführer

5.1.6 Lupeg GmbH Pegnitz

- ✓ 12/2020 – 11/2023 Herr Dipl. Ing Günter Skarupa, Geschäftsführer
- ✓ 12/2020 – 11/2023 Frau Petra Wieding, Projektmitarbeiterin

5.2 Material und Systeme

5.2.1 Technische Systeme

5.2.1.1 Robotersysteme



Versuchsstand 1	Versuchsstand 2
Toshiba Scara Roboter Typ: TH850 4-Achser	IGUS Raumportalroboter DLE-RG-0001
Haushalt/SQM	DiKoRo Projektmittel
<ul style="list-style-type: none"> ✓ mit Toshiba Robot Control TS2100 ✓ Teaching Handgerät ✓ Software auf Windows PC „TSPC“, direct an die Viscotec Steuerung angeschlossen ✓ diese kann nur Viskotec Pumpe als Digital-Out ein und ausschalten 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ mit igus® Robot Control Robotersteuerung für Delta- und Portalroboter Steuerung ✓ Stütz- und Hüllsystem HS Hannover Eigenfertigung aus Bausatz item Industrietechnik GmbH für Konstruktion Verbindung u. Zubehör
	
Pumpe direkt am Roboterarm befestigt und komplett mitbewegt	Pumpe stationär am Gestell Düse über Schlauch verbunden
Betrieb als kollaboratives System nicht möglich!	Betrieb als kollaboratives System über Gameport möglich

Abbildung 5-2: Versuchsstand 1 und Versuchsstand 2 in der Hochschule Hannover

5.2.1.2 Offline und Online Digitalkameras zur Bilderkennung Objekterkennung

- Digitalkamera der Firma Nikon (Haushalt/SQM)
- Raspberry Pi HQ Kamera mit Drehteller über die I/Os
- 3D Scanner über Photogrammetrie mit Software auf dem Notebook da die Graphikarte genutzt wird. (Haushalt/SQM)
- Kamera für Igus vom ifm Typ: Objekterkennungssensor O2D502 und Objekt Schwere Punkt und Drehwinkel Ausrichtung als Ergebnis als Text String in Bild Koordinaten oder Umrechnung intern zur Roboter Koordinate. (Projektmittel)

5.2.1.3 Dosiereinrichtungen


Viscotec Excenterschneckenpumpe Haushalt/SQM	Nassenheider Zahnrad und Impellerpumpe Haushalt/SQM
<ul style="list-style-type: none"> ✓ mit Viscotec SPS Motor Steuerung ✓ HMI-Display zur Parametrierung der Dosierung 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ mit Nassenheider Steuerung ✓ Small Display zur Parametrierung der Dosierung
<p>I. Optional angeschlossen an den Toshiba Roboter mit nur Ein- und Ausschalten</p> <p>II. Optional angeschlossen an dem Igus Gentry mit einem Digital/ Analog Converter Umsetzer damit die Pumpe in 0%, 25%, 50%, 75% und 100% Schritten gesteuert werden kann.</p>	<p>Manuelle Vorwahl der Pumpenleistung.</p> <p>Nur Ein- Ausschalten über Kontakt möglich.</p>
	

Abbildung 5-3: Dosiersysteme Viscotec und Nassenheider

5.2.1.4 Formenherstellung

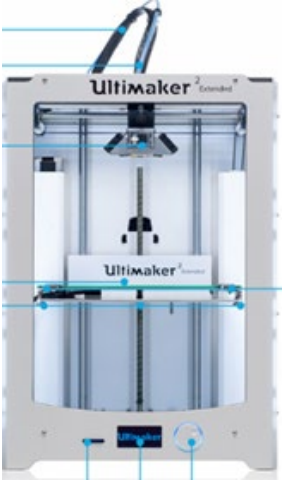
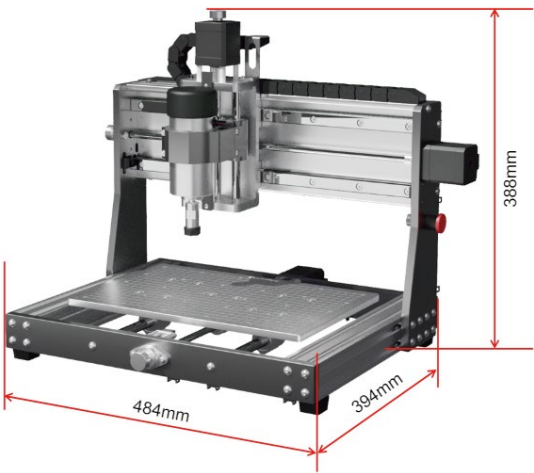
3D Drucker der Firma Ultimaker Typ: Extended 2 Haushalt/SQM	CNC Fräse SaintSmart Genmitsu 3020-PRO MAX DiKoRo Projektmittel
<ul style="list-style-type: none"> ✓ FFF/FDM Filamentschmelzverfahren ✓ Druckgeschwindigkeit: 30-300 mm/s ✓ Filamentdurchmesser: 2,85 mm ✓ Düse: 0,25mm, 0,4 mm, 0,6 mm, 0,8mm ✓ Plattform beheizt: ja 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ GRBLControl/Candle 1.17(Windows) zur Simulation und Übertragung der g-Code Bahnkoordinaten (Software kostenlos) ✓ UGS Universal g-Code Sender dasselbe wie Candle (Software kostenlos)
	

Abbildung 5-4 3D Drucker und 3D Fräse

5.2.1.5 Schnittstellen- und Hilfshardware Arduino UNO (Projektmittel)

mit einzelnen Motortreibern bzw. CNC Shield V3 Bundle mit Schrittmotor Treiber Stepper mit Kühlkörper für 3D Drucker „grbl“-Software zur Steuerung von CNC und 3D Druckern

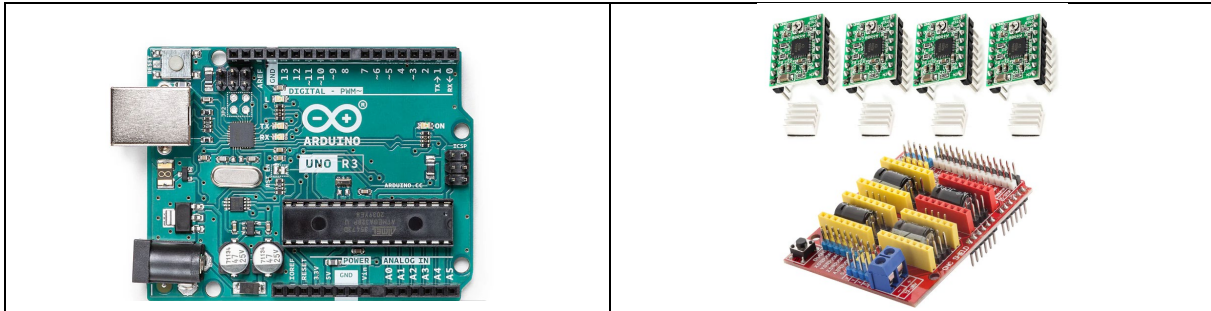


Abbildung 5-5: Schnittstellen- und Hilfshardware Arduino UNO

5.2.1.6 Weiteres Zubehör und Messmittel:

- ✓ Rotationsviskosimeter Anton Paar Typ Physica MCR 101 (Haushalt)
- ✓ Diverse Waagen und Thermometer (Haushalt/SQM)
- ✓ Standard Küchenmaschine für die Massebereitung (Haushalt/SQM)
- ✓ Kühlraum (Haushalt/SQM)



5.2.2 Software

- ✓ Emulationssoftware Emulate 3D (Rockwell Automation über SimPlan AG Education Lizenz SQM)
- ✓ Simulationssoftware PacSi (SimPlan AG Education Lizenz)
- ✓ Kalkulationssoftware OEEtoGo (SimPlan AG Education Lizenz)
- ✓ Datenerfassungssoftware MDCE (SimPlan AG Education Lizenz)
- ✓ Diverse zugehörige Steuerungssoftware
- ✓ Test u.a. von Fusion 360 Guides, Carveco Maker, Easel, Snapmaker Luban, EstlCam,
- ✓ Autodesk Fusion 360 und Tinkercad Studentenlizenz
- ✓ Ultimaker Cura Transformation von 3D Objekten zur Bahnplanung
- ✓ Python kostenfrei
- ✓ Programmiersoftware Embarcadero RAD Delphi 12.1 + TMS Suite (Haushalt SQM)

5.2.3 Material

5.2.3.1 Untersuchte und eingesetzte Massen und Lebensmittel

Produktbereich A

- ✓ Royal Icing / Rezeptur und Bereitstellung Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen
- ✓ Lebkuchen als Grundkörper Bereitstellung Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen
- ✓ Kartoffelstärke und Tapetenkleister als Dummy Masse für das Royal Icing (Projektmittel)
- ✓ Dekorierte Lebkuchen als Referenzprodukte Bereitstellung Heinrich Schulze Ladencafé GmbH
- ✓ Kartoffelpüree für erweiterte Dosier- und Formungsversuche (Projektmittel)
- ✓ Laugenteig für erweiterte Dosier- und Formungsversuche (Haushalt/SQM)

Produktbereich B

- ✓ Marzipan Rohmasse und Rotunden (J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck)
- ✓ handgefertigte Marzipantorten als Referenzprodukte (J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck)
- ✓ Plätzchenteig als Vergleichsprodukt für die Ausformung von Medaillons (Haushalt/SQM)
- ✓ Fondant als Vergleichsprodukt für die Ausformung von Medaillons (Haushalt/SQM)

5.2.3.2 *Eingesetzte technische Materialien (Anteilig Projektmittel/Haushalt/SQM)*

- ✓ 3D Druck Filament für die eigene Herstellung von Adaptern, Lebkuchendummys und Gehäusen
- ✓ 3D Druck Filament für die Formenherstellung
- ✓ Holzplatten als Testkörper für die gefrästen Formen
- ✓ Al-Platten als Gegenform zum Extrudieren
- ✓ HDPE-Platten als Grundkörper für die gefrästen Formen
- ✓ Standard- (für die Formplatten) und Spezialfräser (für die Marzipanmasse)
- ✓ Feinstbohrer für die Entlüftungslöcher der Marzipanformen
- ✓ Düsensortimente für das Royal Icing
- ✓ Kunststoffschläuche für das Royal Icing
- ✓ Diverse Kleinteile

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten

6.1 Produktauswahl

Gemäß Projektantrag sind die Analysen und Experimente als Grundlage eines digitalen Prozessmodells am Beispiel von Robotern für individualisierte Lebensmittel in der Produktion von KMU auf die handwerklichen Prozesse der beiden industriellen Projektpartner Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen (Produktion von dekorierten Lebkuchen) und J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck (Produktion von Marzipantorten) orientiert. Damit sind zwei Produktbereiche A) und B) gegeben, die hinsichtlich der Fragestellungen der digitalen Transformation vielfältige und auch weiter übertragbare Gemeinsamkeiten, aber auch lebensmitteltechnologisch ganz spezifische Herausforderungen aufweisen.

6.1.1 Produktbereich A: Niedrigviskose Massen zum Bilden von Freiformstrukturen

Als Referenz dient im Produktbereich A das sogenannte Royal Icing, als eine Variante der Eiweißspritzglasuren:

Eiweißspritzglasuren bestehen aus Eiklar und Puderzucker im Verhältnis von ca. 1 zu 5. Fruchtsäure oder Zitronensaft unterstützen das Aufschlagen, Geschmeidigkeit und Konsistenz sowie die Spritzfähigkeit. Zur farblichen Gestaltung werden ggf. Lebensmittelfarben zugesetzt. Nur unmittelbar nach ihrer Bereitung ist die Spritzglasur auf die Süßwaren auftragbar. Eiweißglasuren sind nach dem Trocknen relativ hart. Die Intensität, mit der gerührt bzw. „geschlagen“ wird, bestimmt wesentlich die Eigenschaften der Glasur. Bei der Anwendung als Überzug erfolgt eine Verdünnung mit Eiklar, bei der Spritzglasur muss die Mischung zusätzlich mit Zucker andickt werden. Eine optimale Aufspritzebarkeit erfordert eine glatte, elastische, zähflüssige und klumpenfreie Masse. Es muss gewährleistet sein, dass der aus der Spritztüte austretende dünne Faden nicht abreißt. Eiweißspritzglasuren werden u. a. zur Veredelung von Lebkuchen- und Marzipanfiguren verwendet.¹

Als Alternativen werden

- Kartoffelpüree zur Formung von Herzoginkartoffeln (vgl. Abschnitt 6.3.4) und
- Teig zur Formung von Laugengebäck (vgl. Abschnitt 6.3.5)

betrachtet.

¹ LODERBAUER, J., 2003: Das Bäckerbuch. Grund- und Fachstufe, 2. Aufl. Hamburg: Handwerk und Technik

6.1.2 Produktbereich B: Hochviskose Massen für komplexe Geometrien

Im Produktbereich B wird Marzipan zum Ausformen von komplexen Geometrien und bildlicher Darstellung als Referenz fokussiert:

Marzipan setzt sich aus Mandeln sowie Zucker und ggf. Aromastoffen zusammen. Die Mandeln werden gereinigt, im Brühförderer blanchiert und anschließend geschält. Je höher der Rohmandelanteil, umso hochwertiger das Marzipan. Der Bittermandelanteil soll nur 5 % aufweisen. Für den anschließenden Zuckerzusatz gilt die umgekehrte Regel – je weniger Zucker, umso höher die Qualität. Als Zucker wird Glucose, Glucosesirup und Sorbit verwendet. Die Letzteren halten die Masse plastisch, verhindern Kristallisierung und erhöhen die Feuchtigkeitsbindung. Ggf. wird Invertase für den enzymatischen Abbau von Rüben- zu Invertzucker zugegeben, um die Feuchtigkeitsbindung und die Frischhaltung zu optimieren. Das Mandel-Zucker-Gemisch wird zerkleinert, gewalzt und 30 min bei 90-105 °C unter Rühren über offener Flamme geröstet. Dies reduziert den Wassergehalt und erhöht die Haltbarkeit. Bei max. 17 % Feuchte muss die Rohmasse mindestens 28 % Mandelöl enthalten. Beim Röstprozess verbinden sich die Mandeln mit dem Zucker zu einer formbaren, plastischen Masse. Ggf. werden Aromen zugesetzt.²

Als Alternativen werden

- Plätzchenteig und
- Fondant

betrachtet.



Beispiel Produktbereich ³



Beispiel Produktbereich ²

Abbildung 6-1: Konventionell (manuell) erstellte Beispiele beider Produktbereiche

² J.G. NIEDEREGGER GMBH & CO. KG, 2020: Niederegger Lübeck. <https://www.niederegger.de/>

³ Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen

6.2 Analysen bei den lebensmittelproduzierenden Partnern

6.2.1 Lebkuchenproduktion und-dekoration Heinrich Schulze Ladencafé GmbH

6.2.1.1 Herstellung Lebkuchenherzen

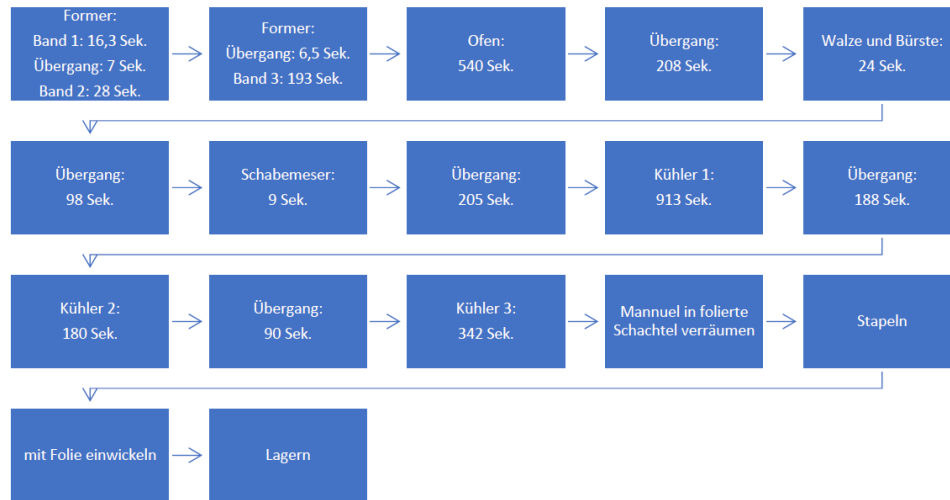


Abbildung 6-2: Schema Herstellung Lebkuchenherzen

6.2.1.2 Dekorieren der Lebkuchenherzen



Abbildung 6-3: Schema Dekorieren Lebkuchenherzen

Herzbezeichnung	ca. Größe [cm]	ca. Gewicht [g]	Buchstaben [Anzahl]
Zierherz Gr. 62	14 x 12,5	80	ca. 8
Zierherz Gr. 3	15 x 17	100	ca. 10
Zierherz Gr. 63	17 x 15	120	ca. 12
Zierherz Gr. 64	19 x 18	150	ca. 20
Zierherz Gr. 65	21 x 22	200	ca. 25
Zierherz Gr. 6	23 x 22	225	ca. 30
Zierherz Gr. 67	31 x 27	400	ca. 40
Zierherz Gr. 11	46 x 43	1200	Ca. 80
Zierherz Gr. 12	58 x 55	2000	ca. 80+

Abbildung 6-4: Rohherzengrößen

Auf Basis der Ist-Analyse von Herrn Reiko Wendorf (im Rahmen der DiKoRo eingebundenen Projekt- und Bachelorarbeit) bei der Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen erfolgte auch die Entwicklung (CAD-Modellierung und 3D-Druck) wiederverwendbarer Dummies für Dosierversuche mit gezielter Variation zur Untersuchung der Auswirkungen von Produktionstoleranzen.

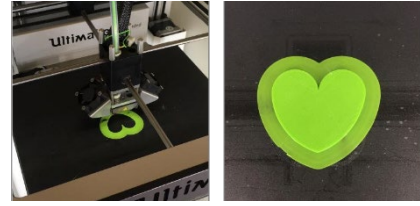


Abbildung 6-5: 3D Druck von Dummies der Lebkuchenherzen

6.2.1.3 Dicken- und Flächenmessung

Als Grundlage der nachfolgenden Charakterisierung erfolgt die Definition von vier aneinander angrenzenden Segmenten des Lebkuchenherzens.

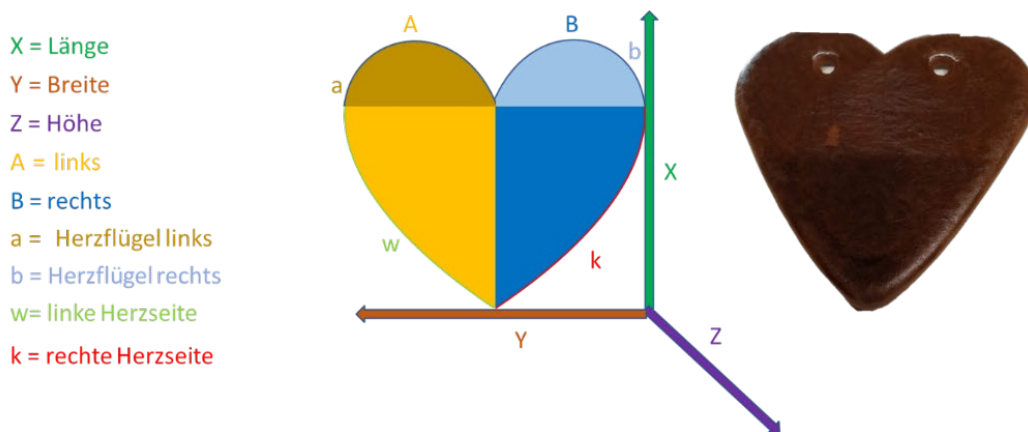
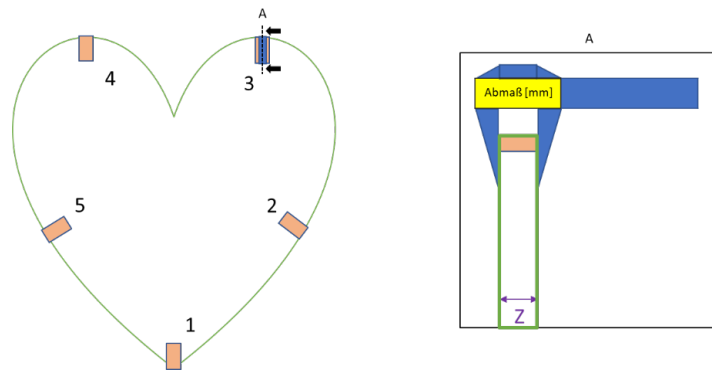


Abbildung 6-6: Definition der Herzsegmente und -parameter



63er	Höhe 1 [mm]	Höhe 2 [mm]	Höhe 3 [mm]	Höhe 4 [mm]	Höhe 5 [mm]	Höhe Durchschnitt [mm]
Arithmetischer Mittelwert	12,055	12,34	12,31	12,36	12,23	12,26
Standardabweichung	0,84	0,68	0,61	0,68	0,87	0,57

n= 100

Tabelle 6: Höhen 67er Lebkuchenherzen, 2020

67er	Höhe 1 [mm]	Höhe 2 [mm]	Höhe 3 [mm]	Höhe 4 [mm]	Höhe 5 [mm]	Höhe Durchschnitt [mm]
Arithmetischer Mittelwert	13,65	13,69	13,44	13,05	13,57	13,48
Standardabweichung	0,48	0,55	0,65	1,05	0,49	0,33

n= 100

Abbildung 6-7: Dickenmessung Prinzip und Ergebnisse für 63er und 67er

Die Länge, Breite, Fläche und der Umfang werden mittels Bilderkennung ermittelt. Das Bild wird mit einem dafür erstellten pythonbasierten Programm vgl. Abschnitt 6.11.3 ausgewertet. Um den Flächeninhalt zu ermitteln, werden die Pixel des Herzens ermittelt, markiert, mit dem Maßstab verrechnet und in [mm²] ausgegeben. Der Umfang ist definiert durch alle Pixel, die eine Kontaktstelle zu einem Pixel ohne Inhalt haben. Diese werden gezählt, markiert, mit dem Maßstab verrechnet und in [mm] ausgegeben. Für die Ermittlung von Länge und Breite wird ein Maleformfactor gebildet. Dieser ermöglicht es dem Programm, das Herz auf dem Bild so zu drehen, dass es nach unten ausgerichtet werden kann. Es werden bis zu zehn Drehungsschritte von 1° gemacht und die Anzahl gezählt. Eine geringere Anzahl als 10 kann als Indikator für ein korrekt ausgewertetes Bild verwendet werden.

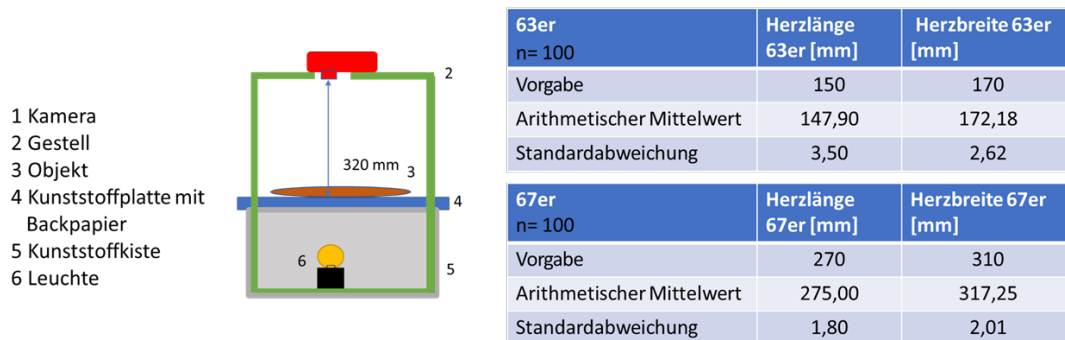
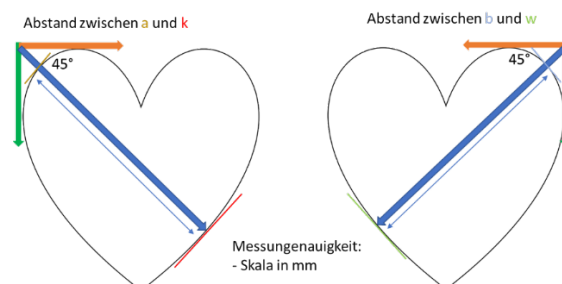


Abbildung 6-8: Flächenermittlung mit Kamera Prinzip und Ergebnisse

6.2.1.4 Symmetriestimmung

Die Symmetrie der Proben wird ermittelt, indem am Herzflügel, ein 45° Messwinkel angelegt wird. Der zumessende Abstand beginnt an der ersten Position, an der die Skala des Messwinkels als erstes das Lebkuchenherz berührt und endet, sobald diese das Herz nichtmehr berührt. Um sicherzustellen, dass der Messwinkel immer identisch liegt, wird eine Auflagestelle des Messwinkels auf beiden Herzflügeln aufgelegt. Um die Symmetrie der Lebkuchen vergleichen zu können, muss die Symmetrie nicht nur von links nach rechts, sondern auch von rechts nach links gemessen werden.



Untersuchte Anzahl je n = 100

63er	Herzflügel 45° links [mm]	Herzflügel 45° rechts [mm]	Differenz [mm]	67er	Herzflügel 45° links [mm]	Herzflügel 45° rechts [mm]	Differenz [mm]
Arithmetischer Mittelwert	154,12	157,39	4,01	Arithmetischer Mittelwert	286,68	286,80	3,64
Standardabweichung	2,84	2,22	2,82	Standardabweichung	2,12	2,47	1,76

19 % rechts größer 74 % links größer 7 % symmetrisch Durchschnittliche Symmetrie 97,47 %	45 % rechts größer 51 % links größer 4 % symmetrisch Durchschnittliche Symmetrie 98,74 %
---	---

Abbildung 6-9: Berücksichtigung der Symmetrie Prinzip und Ergebnisse

6.2.1.5 Balligkeit

Die Ermittlung der Balligkeit ist nur auf der Oberseite notwendig, da sich unten die Auflagefläche befindet und diese immer flach ist und nicht dekoriert wird. Messungenauigkeit: - Skala in mm

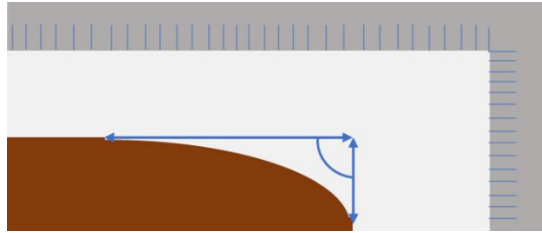


Abbildung 6-10: Messung der Balligkeit

6.2.1.6 Zusammengefasste Parameter

Für die beiden häufigsten Lebkuchengrößen kann zusammengefasst ausgesagt werden:

Ein 63er Lebkuchenherz ist ein Objekt mit:

- dem Ø Gewicht von 94,04 g mit Standardabweichung von 1,93 g,
- einer Ø Höhe von 12,72 mm mit einer Standardabweichung von 0,36 mm,
- einer Ø Länge von 169,85 mm mit einer Standardabweichung von 1,41 mm,
- einer Ø Breite von 145,45 mm mit einer Standardabweichung von 1,67 mm,
- einer Ø Symmetrie von +/- 1,6 %,
- einer Ø Fläche von 18179,67 mm² mit einer Standardabweichung von 178,09 mm²,
- einem Ø Umfang von 509,28 mm mit einer Standardabweichung von 3,71 mm,
- einer Ø Balligkeitslänge von 9,49 mm mit einer Standardabweichung von 1,55 mm und
- einer Ø Balligkeitshöhe von 6,63 mm mit einer Standardabweichung von 0,72 mm.

Ein 67er Lebkuchenherz ist ein Objekt mit

- dem Ø Gewicht von 330,52 g und einer Standardabweichung von 4,21 g,
- einer Ø Höhe von 13,40 mm mit einer Standardabweichung von 0,35 mm,
- einer Ø Länge von 315,51 mm mit einer Standardabweichung von 1,74 mm,
- einer Ø Breite von 2,72,46 mm mit einer Standardabweichung von 3,71 mm,
- einer Ø Symmetrie von +/- 1,16 %,
- einer Ø Fläche von 60793,15 mm² mit einer Standardabweichung von 646,73 mm²,
- einem Ø Umfang von 971,27 mm einer Standardabweichung von 12,05 mm,
- einer Ø Balligkeitslänge von 9,49 mm mit einer Standardabweichung von 1,47 mm und
- einer Ø Balligkeitshöhe von 8,67 mm mit einer Standardabweichung von 1,07 mm.

6.2.1.7 Herstellung Royal Icing

Die Herstellung umfasst: das Mischen, Eindrehen und Auspressen von Überschüssen.



Abbildung 6-11: Vorbereitung: Traditionelle Arbeitsschritte

6.2.1.8 Verarbeiten Royal Icing – Dekorationsprozess

Die manuelle, handwerkliche Verarbeitung erfolgt durch:

- Spritztüte mit Tülle Ansetzen an unterer Spitze
- Außendekoration bis obere Herzseite
- Absetzen
- Erneutes Ansetzen
- Dekoration bis untere Spitze

Erfolgsentscheidungen sind:

- ✓ Auftragswinkel (individuell und je nach Position verschieden, zw. ca. 30-70°)
- ✓ Auftragsabstand (Höhe)
- ✓ Fehler vermeiden: „Tülle kratzt auf Oberfläche“
- ✓ Intuitiv ausgleichen: „So niedrig wie möglich, so hoch wie nötig“
- ⇒ Motivation, Know-how und Fertigkeiten der Mitarbeitenden



Abbildung 6-12: Traditionelle handwerkliche Dekoration

Royal Icing Originalrezeptur (1 kg Portion)

- Puderzucker: 1000 g
- Wasser: 160,75 ml
- Eiweißpulver „Germania S“: 33 g
- Zitronensäurepulver: 6,75 g

Eiweißpulver „Germania®-S“ (Hühnereiweiß)

- Zusammensetzung
 - 57 % Kohlenhydrate (Zucker)
 - 35 % Hühnereiweiß
 - 4 % Johannisbrotkernmehl (E446, Verdickungsmittel)
 - 3 % Kaliumphosphat (Säureregulator)
 - 1 % Salz



6.2.1.9 Trocknung

Die Trocknung erfolgt offen lagernd über 12h.

Abbildung 6-13: Rohstoffe, Spritztüten und -tüllen, sowie Trocknung

6.2.2 Tortenproduktion J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck

Eine Marzipantorte besteht aus Marzipan, ummantelt von Schokolade und einem Aufleger, welcher ebenfalls aus Marzipan besteht.



<https://www.worldofsweets.de/Niederegger-Marzipan-Torte-185g.307354.html>



<https://www.werbeartikelhandel.com/niederegger-marzipan-schokoladen-torte-250g-mit-motiv>

Abbildung 6-14: Marzipantorten Beispiele

Die Marzipan-Aufleger können individuell für Firmen designt und handgefertigt hergestellt werden (mit Firmenlogo etc.). Üblicherweise erfolgt dies für besondere Anlässe, wie zum Beispiel als Präsente zu Weihnachten (Hauptgeschäft). Auf speziellen Kundenwunsch kann der Aufleger auch mit Farbe geschminkt werden.

- ✓ Mögliche Größen: 125g, 250g, 400g, 500g und 750g
- ✓ Mögliche Formen: rund, eckig und oval

Marzipan ist aufgrund des dominierenden Mandelanteils sehr fettig, aber gut formbar. Die Konsistenz von Marzipan ist von der Temperatur abhängig, weshalb es schwierig maschinell zu bearbeiten ist. Die Haltbarkeit beträgt 6 Monate bei Raumtemperatur. Die Herstellung von Marzipan ist in der Literatur vgl. auch Abschnitt 6.1 hinreichend beschrieben und wie auch die Produktion der Torten als Grundkörper für die Aufleger nicht relevant für die Automatisierungsmöglichkeiten bei der Herstellung und dem Handling der Aufleger.

Die Tortenaufleger sind Medaillons aus Marzipan, die aus einer im Allgemeinen runden Grundform und einem darauf befindlichen, erhabenem Dekor bestehen. Dieses kann sowohl abstrakte Geometrien als auch bildliche Darstellungen und Schriftzüge umfassen.

Die kunsthandwerkliche Herstellung der sogenannten „Schweifelformen“ als Negativform ist extrem zeitaufwendig und durch unternehmensbezogenes bis hin rein personifiziertes Know-how getragen. Sie steht unter Sperrvermerk. Wesentlich für die Arbeitsschritte im Projekt DiKoRo ist die Analyse des konventionellen handwerklichen Vorgehens bei der Herstellung der Tortenaufleger:

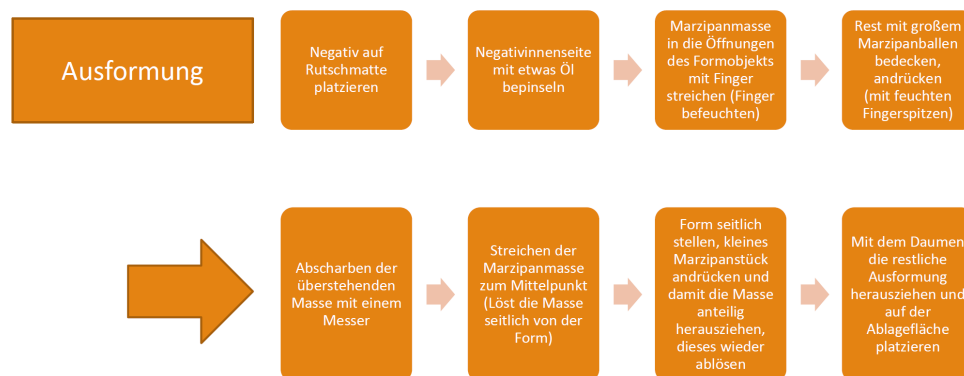


Abbildung 6-15: Manuelle Formung der Tortenaufleger

Im Ø werden manuell 100 Torten je Schicht produziert. Je nach Größe und Dekor kann dies zeitlich weit abweichen

6.3 Produktbereich A: Niedrigviskose Massen

6.3.1 Produkt- und Prozessparameter

6.3.1.1 Vorversuche

Erste Vorversuche erfolgten mit dem von Beginn an (Grundausrüstung Verpackungslabor) verfügbaren Versuchsstand 1 (Toshiba Scara Roboter plus Viskotec Excenterschneckenpumpe). Eingesetzt wurde Tapetenkleister (Carboxymethylcellulose-Basis) und zunächst eine Dosierung auf gute reinig bare Kunststoffoberfläche und im zweiten Schritt auf einen 3D gedruckten Produktdummy. Während sich Letzterer für eine Vielzahl an Versuchen (außer der Oberflächenhaftung) ausreichend repräsentativ und ressourcenschonend erwies, zeigten die Bestimmungen der Produktparameter (Dichte, Viskosität, ...) eine nicht zu vernachlässigende Abweichung des darauf beruhenden Dosierverhaltens zwischen Kleister und Royal Icing.

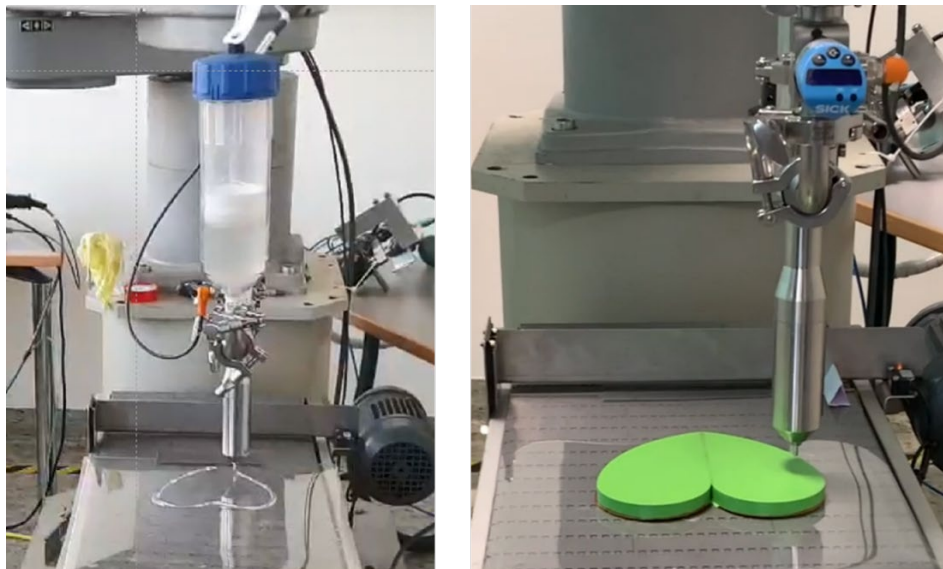


Abbildung 6-16: Vorversuche am Versuchstand 1

Neben der schon benannten und mittelfristig eingesetzten Tapetenkleister wurden weitere Varianten in Betracht gezogen:

Alternative zu Zuckerguss								
Produkt	Name/VP	Marke	Preis (Solvat)	Rezept	Aushärtezeit	Beschaffenheit	Rheologische Eigenschaften	Eignung
Zuckerguss	Puderzucker	Sweet Family (familia)	0,59 €/250 g	100 g + 20 g H ₂ O ohne kochen	5-15 min (Festblock)	zähfl.-härtend, rühren hilft; später	kont. Fluss/Strahl; füllmengenabhängig ansl. Totalaushärtung	nein
Steviaguss	Stevia-Pulver	familia-Handelsmarke	10-20 €/75 g Pulver/d.h. VP/Einheit	zu wenigen ml Wasser bereits 1/3 von 75 g	60-180 min (Festkleber)	gering-zähfl., schäumend (fester Schaum)	rel. kont Fluss, klebrig, Schichtbildung nach 1 h, extrem hoher Süßgeschm.	jein
Maisstärke	Speisestärke	ja! (Rewe)	0,59 €/400 g	30 g + 500 g H ₂ O mit Kochen	7-Xy min (Pudding)	glibbrig-pampig, rühren hilft etw.; später = Pudding	sehr disk. Fluss/Strahl; mit der Zeit immer	nein
Kartoffelstärke	Kartoffelmehl	Küchenmeister (Rewe)	0,89 €/500 g	30 g + 500 g H ₂ O mit Kochen	7-Xy min (Pudding)	glibbrig-breig, rühren hilft; später = Pudding	kont. Fluss ähnl. Kleister; mit der Zeit ähnl. Pudding, aber immer noch "zähfl."	ja/jein
Tapetenkleister	1:50 normale Tapeten	Swing Decor (Bauhaus)	3,10 €/125 ml	Methylcellulose, Stärkeether: 8,4 g + 500ml	nicht festgestellt	kleisterartig, wenig pampig; stets	rel. kont. Fluss, der etwas irregulär ist... Ursache: Zubereitungsfehler?	ja
Tapetenkleister	1:60 schwere Tapeten	Swing Decor (Bauhaus)	3,10 €/125 ml	Methylcellulose, Stärkeether: 10 g + 500ml H ₂ O	nicht festgestellt	kleisterartig, sehr pampig; z.T. gleichbleibend	rel. disk. Fluss... Ursache: Zubereitungsfehler oder Beschaffenheit der	jein
Shampoo	Duschgel/ Seifenmisch.	Nivea Men (Beiersdorf)	1,99 €/250 ml	Duschgel: Wasser, Tenside, Glycerin, Duft-	nicht festgestellt	gering-zähfl., mech. Einwirkung ->	sehr kont., geschmeidiger Fluss. Nachteil: hohes Schaumbildungspotenzial	ja/jein
Honig	Nektar v. Blüten, Bienen-	verschiedene	2-5 €/500 g VP/ Glas	Invertzucker,... Wasser	nicht festgestellt	gering-zähfl., aber sortenabhängig	rel. kont. Fluss... Nicht verwenden, da = Lebensmittel-Verschwendung!	nein: Schade ums LM!

Abbildung 6-17: Vergleich von Ersatzmedien

6.3.1.2 Dichtebestimmung

Neben der einfach zu bestimmenden und hier deshalb nicht im Detail betrachteten Masse ist die Dichte ein typischer Grundparameter für die Betrachtung viskoser Lebensmittel und ermöglicht - unter der Annahme einer für den Einsatzfall ausreichenden Konstanz bei konstanter Raumtemperatur - mit der vorgenannten Masse eine hinreichende Volumenbestimmung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den singulär betrachteten Proben und dem kontinuierlichen Massestrom während der Dosierung besteht. Letzterer enthält einen nur schwer kontrollierbaren Anteil an Lufteinschlüssen (Mikrobläschen). Industriell kann und muss dies mit Volumen (Magnetisch-Induktiv) und/oder Massestrommessgeräten (Basis Corioliskraft) kontrolliert und geregelt werden. Im Hochschullabor steht jedoch keine derartige, für den relevanten Messbereich geeignete Messtechnik zur Verfügung und war aufgrund ihrer Kostenintensität im Budget auch nicht abbildbar. Analog verhält es sich mit einer in der Literatur und im Expertengespräch (u.a. Ingenieurbüro Rolf Peters Bad Zwischenahn) empfohlenen permanenten Entgasung.

Royal Icing (83 % Puderzucker, 3 % Eiweißpulver, 14 % Wasser)

- 1,27 g/cm³

Royal Icing (Schulze-Rezept: 83 % Puderzucker, 3 % Eiweißpulver, 13 % Wasser, 1 % Zitronensäure)

- 1,11 g/cm³

Zuckerguss (88 % Puderzucker, 12 % Wasser)

- 1,53 g/cm³

Zuckerguss (86% Puderzucker, 14% Wasser)

- 1,49 g/cm³

Tapetenkleister (50 g/L Carboxymethylcellulose-Basis)

- 1,04 g/cm³

Umgebung: 21°C Raumtemperatur, 982 hPa, bewölkt/stürmisch, 48 % Feuchte



6.3.1.3 Viskositätsmessungen

Als dominierender Parameter erweist sich im betrachteten Produktbereich die Viskosität. Zur Plausibilitätsprüfung wurden nicht nur die gemeinsam mit den industriellen Projektpartnern ausgewählten Zielprodukte, sondern auch technologisch ähnliche und alltagsübliche Vergleichsproben bestimmt.

Royal Icing

- 1000 g Puderzucker, 34 g Eiweißpulver, 7 ml Zitronensäure, 161 ml Wasser

Zuckerguss

- 1034 g Puderzucker, 168 L Wasser

Tapetenkleister

- 50 g/L Wasser: Carboxymethylcellulose-Basis

Honig

- fest; ca. 80 % Zucker (Invertzucker), ca. 20 % Wasser, ca. 0,3 % Protein

Nutella

- ~22 % Palmöl, ~10 % Magermilchpulver, ~14 % fettarmer Kakao, ~22 % Haselnüsse, ~32 % Zucker

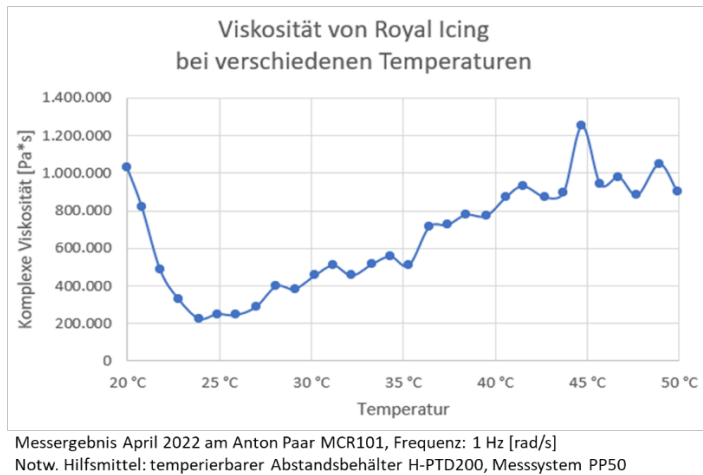
Laugenteig

- 500 g Weizenmehl, 280 g Wasser, 15 g Hefe, 15 g Zucker, 10 g Salz, 40 g Margarine

Bagelteig

- 500 g Weizenmehl, 260 g Wasser, 20 g Hefe, 25 g Zucker, 10 g Salz





Temperatur	Kompl. Visk.	Temperatur	Kompl. Visk.
20 °C	1.032.000 Pa*s	35 °C	510.000 Pa*s
21 °C	822.000 Pa*s	36 °C	714.000 Pa*s
22 °C	486.000 Pa*s	37 °C	726.000 Pa*s
23 °C	330.000 Pa*s	38 °C	780.000 Pa*s
24 °C	227.100 Pa*s	40 °C	774.000 Pa*s
25 °C	250.500 Pa*s	41 °C	876.000 Pa*s
26 °C	245.700 Pa*s	42 °C	933.000 Pa*s
27 °C	288.900 Pa*s	43 °C	873.000 Pa*s
28 °C	399.000 Pa*s	44 °C	897.000 Pa*s
29 °C	384.000 Pa*s	45 °C	1.254.000 Pa*s
30 °C	456.000 Pa*s	46 °C	942.000 Pa*s
31 °C	510.000 Pa*s	47 °C	981.000 Pa*s
32 °C	456.000 Pa*s	48 °C	885.000 Pa*s
33 °C	516.000 Pa*s	49 °C	1.050.000 Pa*s
34 °C	558.000 Pa*s	50 °C	900.000 Pa*s

Viskosität abhängig von der Temperatur

- starke Abnahme ab 20°C
- ~ leicht kont. Anstieg ab 24-27°C
- Höhepunkt bei 44°C, danach etwas sinkende od. gleichbleibende Tendenz auf erhöhtem Niveau

Abbildung 6-18: Ausgewählte Ergebnisse der Viskositätsmessung

6.3.1.4 Kompressibilität, Entlastung und Nachlauf

Schon erste Vorversuche zeigten eine, die Dosier- und Abbildungsqualität entscheidend nachteilig beeinflussende, Neigung bei allen untersuchten Rezepturen zu Kompressibilität/Elastizität und darauf beruhenden erheblichen Nachlauf und Nachtropfverhalten.



Abbildung 6-19: Ausdehnung und erheblicher Nachlauf

In Vorbereitung eines systematischen Versuchsplanes wurden deshalb alle relevanten Einflussgrößen zusammengetragen:

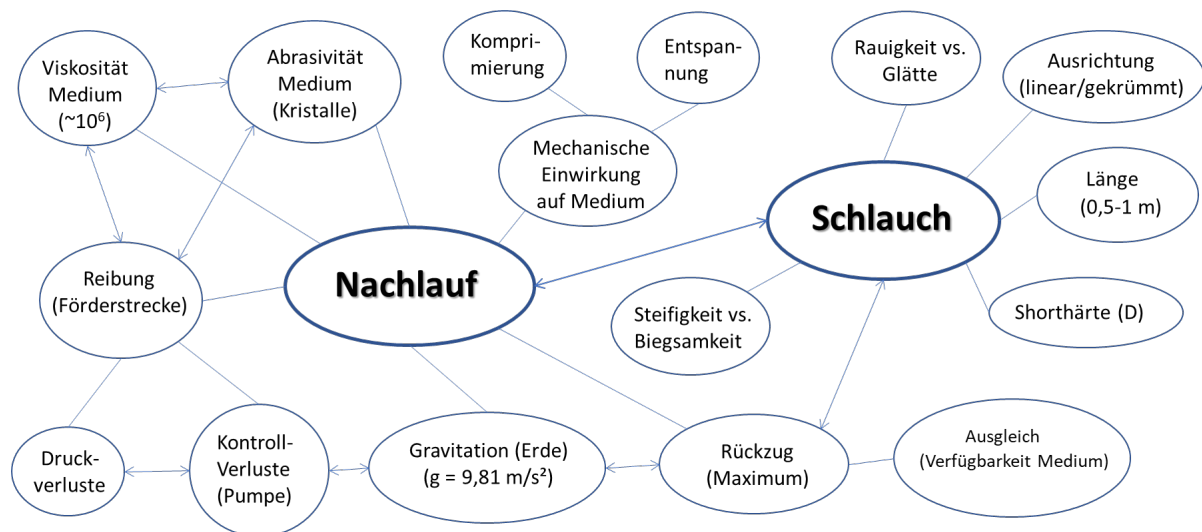


Abbildung 6-20: Mindmap der Einflussgrößen

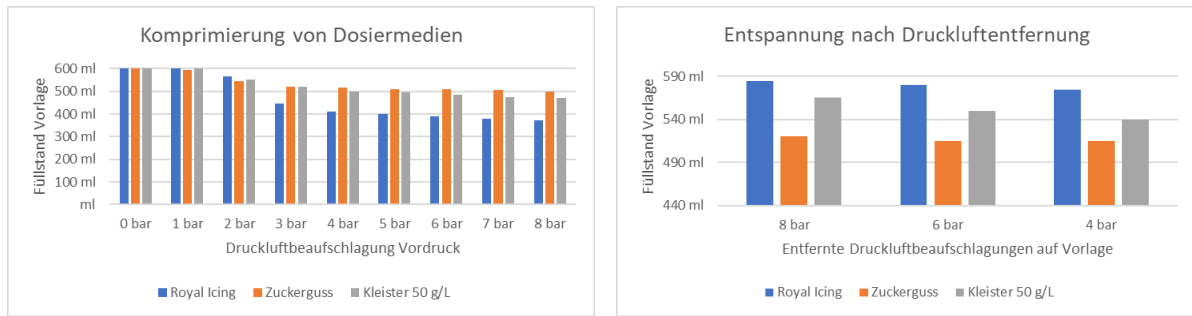
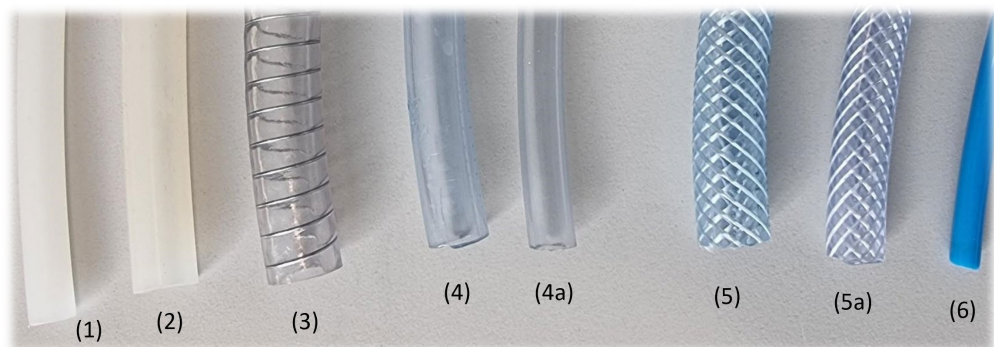


Abbildung 6-21: Rezepturabhängige Elastizität der Dosiermasse

Als technische beeinflussbare Größe erweist sich die Materialauswahl für den Zuführschlauch. Dies ist insbesondere bei erheblicher Schlauchlänge (> 5cm) wie am Versuchstand 2 relevant. Dabei ist ein Kompromiss zwischen hinreichender Durchmesserstabilität (kein Aufblähen) und ausreichender Flexibilität zum Ausgleich der Bewegung zwischen der starr/stationär befindlichen Dosierpumpe und der im Arbeitsraum an den Roboterachsen frei beweglichen Düse zu finden.



- | | | |
|--|--|------------------------------|
| (1) HDPE-Schlauch $d_i = 8 \text{ mm}$ | (4) PVC Glasklar $d_i = 10 \text{ mm}$ | (6) <u>Pneumatikschlauch</u> |
| (2) Silikonschlauch $d_i = 10 \text{ mm}$ | (4a) PVC Glasklar $d_i = 8 \text{ mm}$ | |
| (3) PVC Saugschlauch $d_i = 10 \text{ mm}$ | (5) PVC Raufilam E $d_i = 10 \text{ mm}$ | |
| | (5a) PVC Raufilam E $d_i = 8 \text{ mm}$ | |

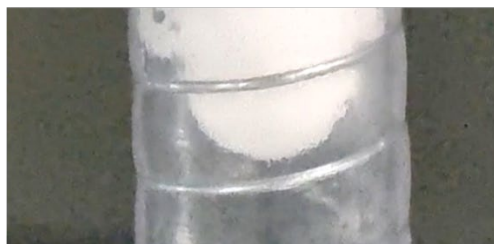
Abbildung 6-22: Varianten der Zuführschläuche



Überdruck im Schlauch: starke Befestigung nötig



Strahlaustritt zu Beginn



Füllstrahl während Dosiervorgang: Bewegung im Armorvin-Saugschlauch 3/8" im igus-System (90°)



Füllstrahl nach Abtropfphase: ist jedoch variabel

Abbildung 6-23: Typische Fehler bei Schlauchauswahl und -einsatz

6.3.1.5 Anhaftung je nach Oberflächenparameter

Versuch 1			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 10 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 10 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 10 %	Oberfläche PP-Folie
Versuch 2			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 20 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 20 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 20 %	Oberfläche PP-Folie
Versuch 3			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 30 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 30 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 30 %	Oberfläche PP-Folie
Versuch 4			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 40 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 40 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 40 %	Oberfläche PP-Folie
Versuch 5			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 50 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 50 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 50 %	Oberfläche PP-Folie

Versuch 6			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 60 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 60 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 60 %	Oberfläche PP-Folie
Versuch 7			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 70 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 70 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 70 %	Oberfläche PP-Folie
Versuch 8			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 80 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 80 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 80 %	Oberfläche PP-Folie
Versuch 9			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 90 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 90 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 90 %	Oberfläche PP-Folie
Versuch 10			
Streifen 1	h = 2 mm	v = 100 %	Streifenlänge 150 mm
Streifen 2	h = 7 mm	v = 100 %	Abstand je 50 mm
Streifen 3	h = 12 mm	v = 100 %	Oberfläche PP-Folie

Rote Schrift = variiert je Versuch
Blaue Schrift = Werte bleiben konstant

Programmierung in iRC-
Software am igus-System

Verschiedene Oberflächen

- PP-Folie
 - unpolar
 - glatt
- PLA-Folie
 - polar
 - glatt
- Lebkuchen-Fläche
(Anforderung Schulze u.Ä. = 20x20cm)
 - polar
 - porig

• Lebkuchenherz horizontal unbehandelt

Haftet, nicht ablösbar

• Lebkuchenherz horizontal Wasserfilm

Haftet, nicht ablösbar

• Lebkuchenherz horizontal Ölfilm

Haftet, schwer ablösbar

• Lebkuchenherz horizontal Mehlfilm

Haftet, kaum ablösbar

• Lebkuchenherz horizontal Stärkefilm

Haftet, kaum ablösbar



• Lebkuchenherz 45°-Ebene unbehandelt

Haftet, läuft nicht herunter

• Lebkuchenherz 45°-Ebene Wasserfilm

Haftet nicht, *verläuft nach 20 s komplet

• Lebkuchenherz 45°-Ebene Ölfilm

Haftet etwas, *verläuft nach 3 min

• Lebkuchenherz 45°-Ebene Mehlfilm

Haftet etwas, verläuft nicht

• Lebkuchenherz 45°-Ebene Stärkefilm

Haftet etwas, verläuft nicht

Abbildung 6-24: Ausschnitt Versuchsplanung Anhaftung und Streifenform

6.3.1.6 Trocknungsverhalten und Aushärtung

Streifen (b = 12 mm, h = 12 mm)

• Nach 2 Minuten

Beginn der Bildung einer Außenkruste

• Nach 5 Minuten

Krustendicke 0,25 mm

• Nach 15 Minuten

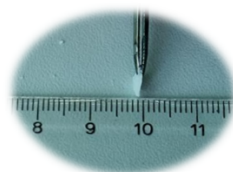
Krustendicke 0,25 mm

• Nach 60 Minuten

Krustendicke 1 mm

• Nach 180 Minuten

Krustendicke 2 mm



✓ Krustenbildung und Komplettaushärtung

➤ wetter-/witterungsabhängig

- Bei kühlerem, feuchtem Wetter

längere Aushärtungsprozesse

-> daraus ergeben sich weitere Versuche

❖ Aushärtung = f (Luftumgebung Oberfläche)

➤ Nach unten: Schichtdickenzunahme

➤ Je mehr Oberfläche in Relation zur

Masse, desto schneller

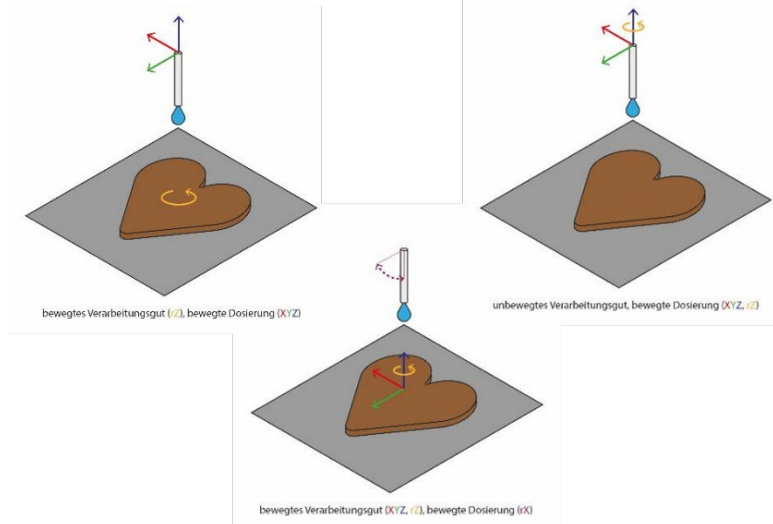
➤ Raumklima: 22°C, sonnig, trocken, 1015 hPa

Abbildung 6-25: Trocknungsverhalten und Aushärtung

6.3.2 Kinematisches Konzept und Bewegungssteuerung

6.3.2.1 Kinematisches Konzept

Während der vorhandene Toshiba Scara Roboter im Versuchstand 1 bauartbedingt über vier unmittelbar sequentiell und rotativ arbeitende Achsen verfügt, weist das aus einem modularen Igus-Bausatz vom Projektteam selbst erstellte Portal (Versuchstand 2) drei orthogonale Achsen und einen adaptiven und unabhängig ansteuerbaren Drehteller auf. Dies ermöglichte bewusst die konzeptionelle Optimierung unter Berücksichtigung der zusätzlichen Freiheitsgrade.



		Dosierung				Verarbeitungsgut					
Kinematische Variante	Translation			Rotation	Umsetzung	Translation			Rotation	Umsetzung	
	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse			X-Achse	Y-Achse	Z-Achse			
Einseitige Kinematik	Bewegte Dosierung (XYZ[rZ]), unbewegtes Verarbeitungsgut	✓	✓	✓	✗	Raumportal	✗	✗	✗	✗	unbewegt
		✓	✓	✓	✓ rZ	SCARA; Gelenkarmroboter; Flächenportal + Hubschwenkeinheit	✗	✗	✗	✗	unbewegt
	Kinematische Umkehr: Unbewegte Dosierung, bewegtes Verarbeitungsgut (XYZ[rZ])	✗	✗	✗	✗	unbewegt	✓	✓	✓	✗	Raumportal
		✗	✗	✗	✗	unbewegt	✓	✓	✓	✓ rZ	SCARA; Gelenkarmroboter; Flächenportal + Hubschwenkeinheit; Raumportal + Drehteller
Beidseitige Kinematik	Bewegte Dosierung (XY[rZ]), bewegtes Verarbeitungsgut (Z[rZ])	✓	✓	✗	✗	Flächenportal	✗	✗	✓	✗	Auslegerachse; Hebetisch
		✓	✓	✗	✗	Flächenportal	✗	✗	✓	✓ rZ	Hubschwenkeinheit; Auslegerachse + Drehteller; Hebetisch + Drehteller
		✓	✓	✗	✓ rZ	Flächenportal + Schwenkeinheit (?)	✗	✗	✓	✗	Auslegerachse; Hebetisch
	Kinematische Umkehr: Bewegte Dosierung (Z), bewegtes Verarbeitungsgut (XY)	✗	✗	✓	✗	Auslegerachse	✓	✓	✗	✗	Flächenportal; Kreuztisch
		✗	✗	✓	✓ rZ	Hubschwenkeinheit	✓	✓	✗	✗	Flächenportal, Kreuztisch
		✗	✗	✓	✗	Auslegerachse	✓	✓	✗	✓ rZ	Flächenportal + Schwenkeinheit (?); Flächenportal + Drehteller; Kreuztisch + Drehteller
	Bewegte Dosierung (XYZ), rotierendes Verarbeitungsgut (rX/rZ)	✓	✓	✓	✗	Raumportal; SCARA; Gelenkarmroboter	✗	✗	✗	✓ rX/rZ	Drehteller
		✓	✓	✓	✓ rZ	Raumportal + Drehteller; SCARA; Gelenkarmroboter	✗	✗	✗	✓ rX	Drehteller
	Kinematische Umkehr: Rotierende Dosierung (rX/rZ), bewegtes Verarbeitungsgut (XYZ)	✗	✗	✗	✓ rX/rZ	Schwenkeinheit (?)	✓	✓	✓	✗	Raumportal; SCARA; Gelenkarmroboter
		✗	✗	✗	✓ rX	Schwenkeinheit (?)	✓	✓	✓	✓ rZ	Raumportal + Drehteller; SCARA; Gelenkarmroboter

Abbildung 6-26: Bewegungsoptionen

6.3.2.2 Bewegungssteuerung

Schrittweises manuelles Vorgehen (Versuchstand 2)

1. Pfaderstellung Adobe Illustrator®
2. Transfer zu Inkscape®
3. Anpassung Format und Geometrische Abmessungen (Realwert in mm)
4. Einfügen in iRC und Anpassung (Befehle, Positionen, Bahnen)
5. Validierung durch Simulation der Bewegungssteuerung
6. Dosierung / Dekoration

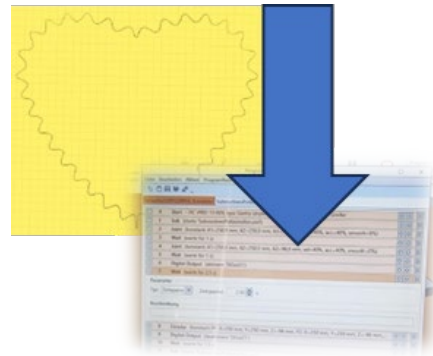


Abbildung 6-27: Bewegungsbahn/Pfade erstellt in Adobe Illustrator/Inkscape – Übertragen auf iRC

Dieses Vorgehen konnte im weiteren Projektverlauf durch ein individuell erstelltes Schnittstellenprogramm (Teil des digitalen Zwillings / Sprache: Python) vgl. Abschnitt 6.6.3 zur automatischen Transformation zwischen den Tools wesentlich verkürzt und sicherer ausgestaltet werden.

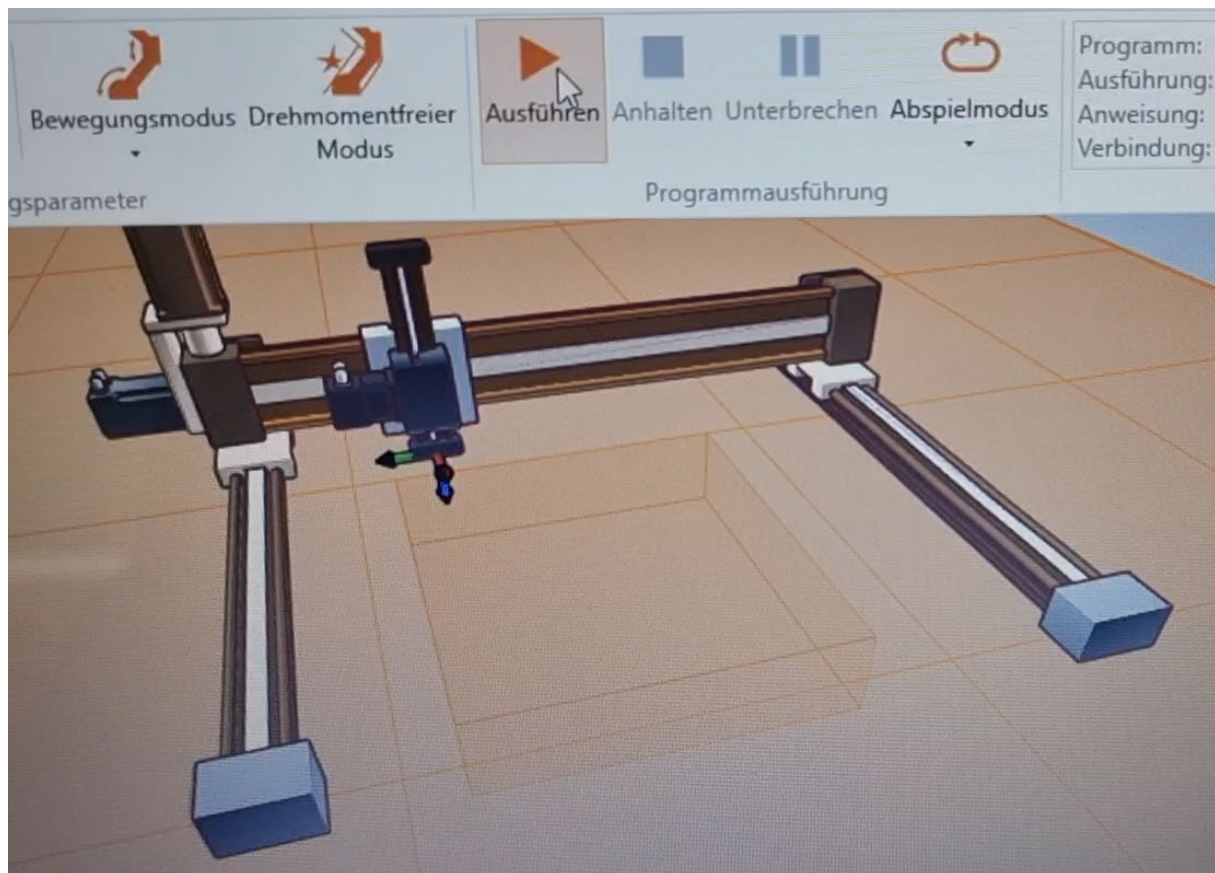


Abbildung 6-28: Simulation der Bewegungsbahn am Versuchstand 2

6.3.2.3 Reaktion auf Nachtropfen und Nachlauf

Obwohl alle alternativ eingesetzten Dosiersysteme über einen Rücklauf/Rückzug am Ende des Dosiervorganges verfügen, führten sowohl die Eigenschaften der Masse und als auch die Elastizität der Zuführschläuche vgl. Abschnitt 6.3.1.4 zu einem erheblichen Nachlauf (> 3cm) und Nachtropfen mit inakzeptabler Veränderung/Verunreinigung der Auftragsstruktur.

Deshalb wurden u.a. ein gesteuertes Bodenventil und optional das nachfolgend abgebildete Abstreifen technisch und programmseitig realisiert.

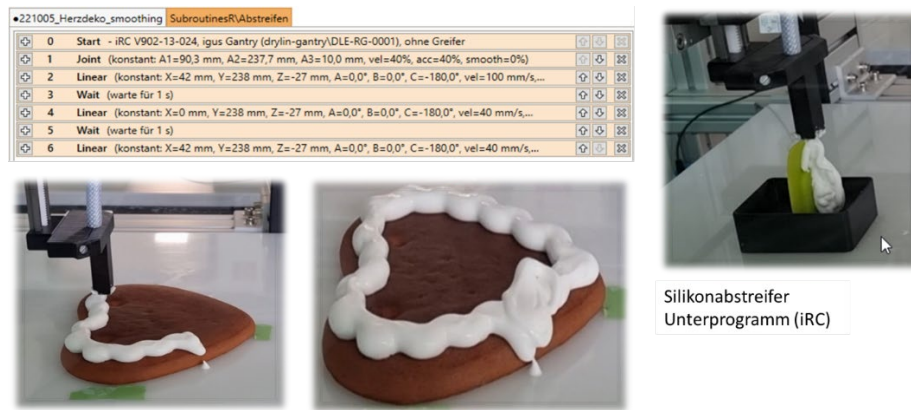


Abbildung 6-29: Programm und Lösung für das Abstreifen am Dosierende

6.3.3 Lineare Strangbildung

Parallel zu den kinematischen Variationen wurden lineare Strangversuche durchgeführt, bei denen insbesondere der Untergrund (trocken, befeuchtet, ...), die Höhe des Dosierventils über dem Untergrund und die Dosierleistung systematisch gegenübergestellt wurden.

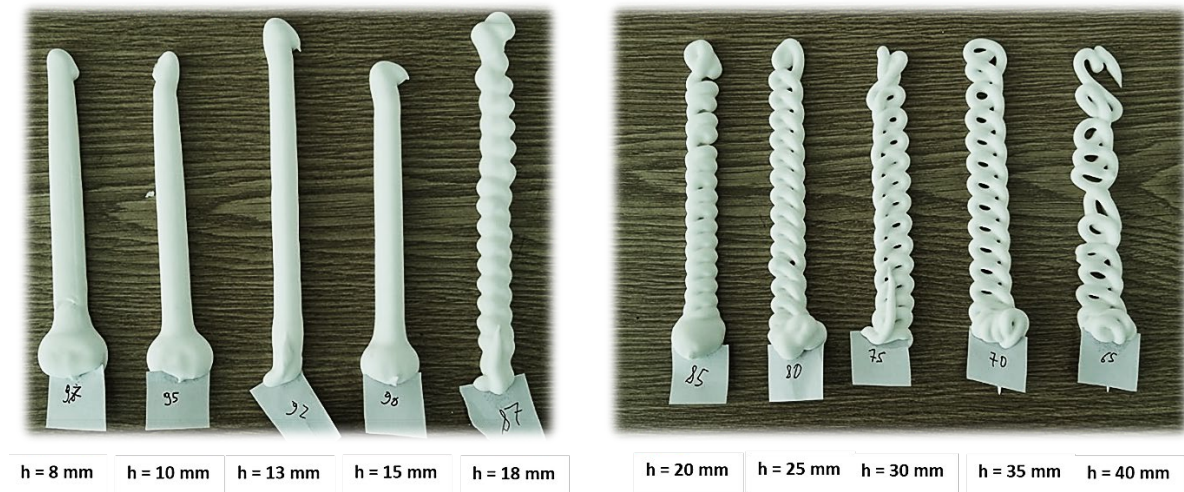
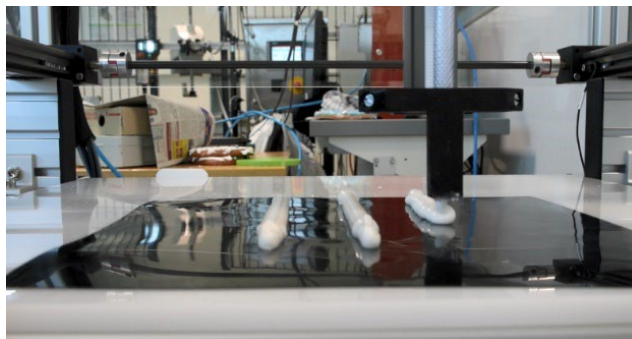


Abbildung 6-30: Erfolgreiche lineare Strangversuche

Hieraus ist das grundsätzlich gegebene Potential abzulesen, auch vergleichbar filigrane Strukturen abbilden zu können! Es ist zu betonen, dass die insgesamt nur hinreichend gelungene, automatisierte



Nachbildung der Abbildungsqualität, wie sie durch das manuelle Dekorieren mit Spritzbeutel erreicht wird, im Wesentlichen auf die im Projektzeitraum nur rudimentäre Kopplungsmöglichkeit (Synchronisation von Roboterbewegung und Pumpenleistung zurückzuführen ist. Essentiell war die durch die Corona Situation verursachte und darüber hinaus anhaltende Nichtverfügbarkeit dafür unverzichtbarer AD / DA Wandler.

Abbildung 6-31: Lineare Strangversuche mit dem Versuchstand 2

Insbesondere an allen Umkehrpunkten der Bewegung (wie Herzspitze, Herzkerbe) und dem Anschluss am Ende des Produktpfades ist eine angepasste Reduzierung der Pumpenleistung unverzichtbar!

6.3.4 Alternative 1: 3D Druck Kartoffelpüree

Mit der am Roboterarm spiralförmig bewegten Dosierpumpe wurde unter Verwendung einer Schlitzdüse Kartoffelpüree als sogenannte Herzoginkartoffeln ausgeformt. Diese ebenfalls niedrigviskose



Masse des Produktbereiches A wies kaum Nachlauf und kein Nachtropfen (wie beim Royal Icing) auf. Die gute Reproduzierbarkeit selbst nach dem Ausbacken weist aus, dass die bei der Lebkuchendekoration mit Royal Icing zu verzeichnenden Probleme nicht auf die Kinematik der Roboterbewegung, sondern auf die ungünstige Abstimmung und fehlende Synchronisation mit der Pumpenleistung zurückzuführen sind!

Abbildung 6-32: Herzoginkartoffeln ungebacken/gebacken

6.3.5 3D Druck Laugengebäck

6.3.5.1 3D Druck mit Versuchstand 1

Die weiteren alternativen Versuche mit Teig zum 3D Druck von Laugengebäck stellten eine gelebte Schnittstelle zwischen Forschungsprojekt und Lehrveranstaltung, hier „Interdisziplinäre Projektarbeit“ im Masterkurs dar. Die kreative Zusammenarbeit von DiKoRo Team und Studierenden erfolgte nachweislich zum gegenseitigen Nutzen. Ein Masterstudent konnte unmittelbar im Anschluss in das Team übernommen werden. Die Betrachtung und die Experimente mit diesem, weiteren alternativen Produkt schärfte auch die Konzeption des Digitalen Zwillings hinsichtlich der gezielt angestrebten Anforderungen der Übertragbarkeit.

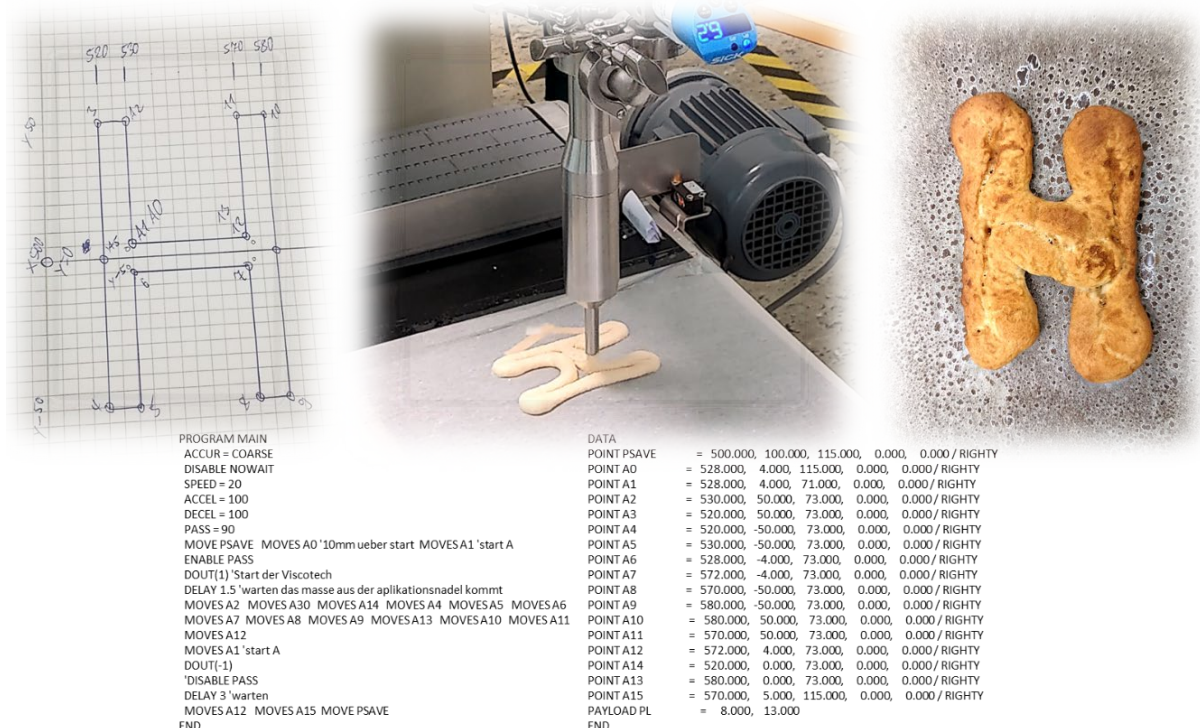


Abbildung 6-33: 3D Druck Laugengebäck mit Programmausschnitt

6.3.5.2 Genutzte Rezeptur

Bestandteil	Menge
Weizenmehl Typ 405 (Diamant, Aurora Mühlen GmbH, Hamburg)	47,5%
Wasser (Leitungswasser)	40,8%
Weizenfaser (WF 200 Vitacel Jens Rettenmaier & Söhne GmbH & CO KG, Rosenberg)	4,75%
Margarine (Deli Reform, Hilter am Teutoburger Wald)	3,80%
Zucker (Diamant, Köln)	1,42%
Salz	0,95%
Trockenhefe (Tewells, Osnabrück)	0,67%

Abbildung 6-34: Rezeptur Laugengebäck

6.3.5.3 Formkonstanz

Als Hefeteig ist beim Laugengebäck eine signifikante Veränderung der Formgebung mit dem Backprozess zu beachten. Während das Royal Icing eher zum geringfügigen Schrumpfen neigt, das Kartoffelpüree respektive die daraus geformten Herzoginkartoffeln, wie auch die im Produktbereich B noch zu betrachtenden Marzipanprodukte nahezu neutral bleiben, so ist beim Laugengebäck ein Aufquellen unvermeidbar.

H-Muster Teig dosiert Versuchstand 1



H-Muster Teig gebacken

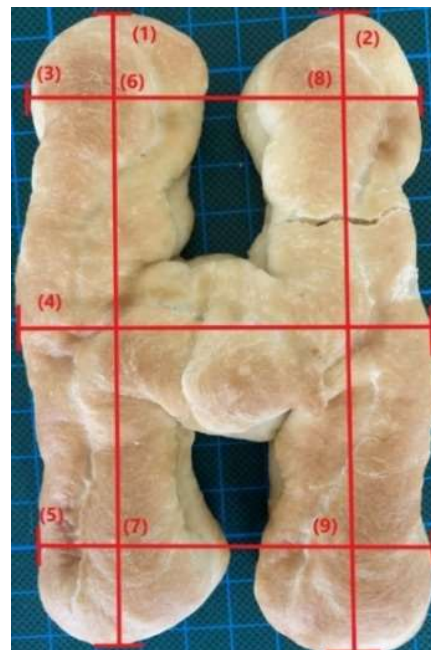


Abbildung 6-35: Vergleich H-Muster ungebacken / gebacken

6.3.6 Hygienische und Mikrobiologische Aspekte

6.3.6.1 Grundsätzliches

Stellvertretend für alle betrachteten Produkte sollen an dieser Stelle am Beispiel des Laugengebäcks die hygienischen und mikrobiologischen Aspekte erörtert werden. Es sind keine im Digitalen Zwilling unmittelbar abzubildenden Wechselwirkungen und Rückkopplungen zur Kinematik oder anderen Bereichen erkennbar. Unabhängig davon, ist aber davon auszugehen, dass die Anforderungen der Hygiene und Mikrobiologie in einem, den Digitalen Zwilling repräsentieren Assistenzsystem zu mindestens als automatisierte Checkliste möglichst mit Hilfestellung leistender FAQ Liste angeboten werden.

Beim Backen werden die meisten Mikroorganismen abgetötet. Dennoch müssen hygienische Aspekte beachtet werden. So muss u.a. die persönliche Hygiene eingehalten werden. Diese wird in der EU-Verordnung 852/2004 beschrieben. Personen, welche Lebensmittel herstellen oder verarbeiten haben hygienische Standards einzuhalten. Dabei muss ein hohes Maß an Sauberkeit eingehalten werden. Dazu gehört zum Beispiel saubere und geeignete Arbeitskleidung. In manchen Fällen kann auch Schutzkleidung benötigt werden⁴.

Laut §43 des Infektionsschutzgesetzes sind Gesundheitsinformationen für den Umgang mit Lebensmitteln notwendig. Es ist für Personen, die mit Lebensmitteln oder den Bedarfsgegenständen wie Tellern und Besteck in Berührung kommen, demnach bei erstmaliger Ausübung notwendig, eine Gesundheitsbescheinigung durch das Gesundheitsamt ausgestellt zu bekommen. Dabei wird die Person auf verschiedene Krankheitserreger getestet (§43 IfSG). Personen mit Krankheiten oder Träger solcher Krankheiten, welche über Lebensmittel übertragen werden könnten, dürfen grundsätzlich nicht mit Lebensmitteln arbeiten⁴.

Es muss gewährleistet werden, dass die Räumlichkeiten, in denen Lebensmittel zum Verkauf hergestellt werden, gewisse hygienische Maßnahmen eingehalten werden. Auch diese sind in der EU-Verordnung 852/2004 beschrieben. Kontaminationen und Hygiene müssen hierbei sowohl bei als auch zwischen den Arbeitsschritten vermieden beziehungsweise gewährleistet werden. Dafür müssen sowohl Wand, Boden als auch Deckenbeläge betrachtet werden. Die Böden und Wände müssen mit einem Material belegt sein, welches abriebfrei, nicht toxisch, wasserundurchlässig und Wasser abstoßend ist. Außerdem müssen Böden und Wände in einem einwandfreien Zustand sein, um sicherzustellen, dass die Böden und Wände leicht zu reinigen und gegebenenfalls auch zu desinfizieren sind. Auf den Böden kann auch ein geeignetes Abflusssystem notwendig sein. Diese Kriterien müssen durch geeignete Bodenbeläge und Wandbeläge eingehalten werden, es kann eine Ausnahme geben, indem andere Boden- und Wandbeläge genutzt werden, wenn die Einhaltung der hier genannten Kriterien den zuständigen Behörden nachgewiesen werden können. Bei den Decken des Gebäudes oder, falls nicht vorhanden, bei den Dachinnenseiten ist zu beachten, dass hier Schmutzansammlungen und Kondensation, sowie Schimmelbefall und das unerwünschte Ablösen von Materialien hier vermieden beziehungsweise auf ein Minimum reduziert werden soll. An Fenstern und sonstigen Öffnungen, welche am Gebäude sind, müssen Schmutzansammlungen vermieden werden. Dies kann durch die Bauweise geschehen. An Fenstern sollten außerdem Insektengitter angebracht werden, vor allem, wenn diese nach außen ausgehen. Diese Insektengitter sollten für Reinigungszwecke leicht abnehmbar sein. Die Fenster sollten während des Herstellungsprozesses geschlossen sein, falls sie zu Kontaminationen des Lebensmittels führen könnten. Türen sollen leicht zu reinigen und zu desinfizieren sein. Das Material der Tür muss einwandfrei sein und zudem eine wasserabweisende Oberfläche besitzen. Sollten hier nicht wasserabweisende Materialien genutzt werden, muss dies von der zuständigen Behörde genehmigt werden⁴.

Flächen und Oberflächen in der Nähe der Herstellungsorte, sowie die Flächen, mit denen die Lebensmittel in Berührung kommen, müssen in einwandfreiem Zustand sein. Außerdem müssen sie leicht zu reinigen und desinfizierbar sein. Die Flächen müssen aus einem glatten, nicht toxischen, abriebsfreien und korrosionsfestem Material bestehen⁴.

Es müssen geeignete Vorrichtungen zur Desinfektion und Reinigung, sowie zur Lagerung von Arbeitsgeräten und Ausrüstungen zur Verfügung stehen. Diese Vorrichtungen müssen aus korrosionsfesten Materialien hergestellt werden. Außerdem müssen diese leicht zu reinigen sein und über eine angemessene Warm- und Kaltwasserzufuhr verfügen. Diese Warm- und Kaltwasserzufuhr muss Trinkwasserqualität haben, um die Lebensmittel nicht zu kontaminieren⁴.

⁴ EG VO 852/2004

Im Hinblick auf die mikrobiologische Kontamination sollte das Lebensmittel bei der Herstellung nicht mit Holzoberflächen in Berührung kommen. Edelstahloberflächen sorgen für eine deutlich bessere Hygiene. Dies gilt, da Holz keine glatte, sondern eher poröse Oberfläche besitzt und somit einen geeigneten Raum für Mikroorganismen bietet. Auch beim Abkühlen und bei der Lagerung sollten keine Holzoberflächen genutzt werden. Auch schlecht zu reinigende Stellen sollen vermieden werden, da sich an solchen Mehlstaub oder auch Teigrückstände sammeln könnten.⁵

6.3.6.2 Prozessgestaltung

Da die Hitze die Keimzahl während des Backvorganges reduziert, muss nach dem Backen besonders auf Hygiene geachtet werden, um eine Rekontamination zu verhindern. Dabei muss nicht nur auf die Oberflächen geachtet werden, welche mit dem gebackenen Lebensmittel in Berührung kommen, sondern auch die Raumluft muss beachtet werden. Diese kann auch kontaminiert sein. Diese Raumluftkontamination besteht zumeist aus Schimmelpilzsporen.⁵

6.3.6.3 Probenahme

Die Probenahme sollte durch die Abklatschprobe erfolgen. Eine Abklatschprobe ist ein nicht destruktives Verfahren, mit dem die Keimzahlbestimmung getätigt werden kann. Dabei wird das Material nicht zerstört, sondern es wird lediglich die Oberfläche abgestrichen. Diese Probe wird an den Oberflächen vorgenommen⁶. Durch die Abklatschprobe kann das Reinigungs- und Desinfektionsverfahren überprüft werden. Außerdem können so die Oberflächeneigenschaften von Maschinen und Arbeitsflächen mikrobiologisch kontrolliert werden. Die persönliche Hygiene, wie zum Beispiel die Keimlast an der Kleidung und an den Händen kann so auch überprüft werden. Auch von dem Gebäck kann eine solche Probe genommen werden. Diese Abklatschprobe hat den folgenden Ablauf:

Zunächst sollen die Hände des Probennehmers gereinigt und desinfiziert werden, um eine Kontamination der Person auszuschließen. Als Nächstes muss das Nährmedium geprüft werden. Dabei wird kontrolliert, dass das Nährmedium trocken ist. Die Lagerungstemperatur muss bereits vor der Probenahme kontrolliert werden. Nachgehend muss der Probenahmeort dokumentiert werden. Dieser wird auf der Petrischale mit dem Fertignährmedium durch einen Permanentmarker aufgetragen. Danach wird die Probe genommen. Dies geschieht, indem die Abklatschplatte für circa 2-3 Sekunden mit leichtem Druck auf das Probemedium gedrückt wird. Daraufhin wird die Platte mit dem dazugehörigen Deckel verschlossen. Nun folgt der Transport in den Brutschrank und die darauffolgende Bebrütung. Im Brutschrank wird für 48h bei $36 \pm 1^\circ\text{C}$ bebrütet. Hierbei werden die Bedingungen so gewählt, dass sich sowohl Bakterien als auch Schimmelpilze vermehren können. Die Auswertung erfolgt durch das Auszählen von Kolonien⁶.

Die Umgebungsluft des Raumes, in dem das Lebensmittel hergestellt wird, wird durch eine offene Petrischale überprüft. Diese wird geöffnet in den Raum gestellt und nach 30 Minuten geschlossen. Daraufhin finden auch hier die Bebrütung sowie die darauffolgende Auszählung der Kolonien statt. Bei diesen Proben wird die Gesamtkeimzahl ermittelt, also werden hier die koloniebildenden Einheiten ausgezählt, was bedeutet, dass die KbE/m³ ausgezählt werden⁶.

6.3.6.4 Mikrobiologische Grenzwerte für Gebäck

Für durchgebackene feine Backware gelten die folgenden Richt- und Grenzwerte. Dabei bedeuten die rot gekennzeichneten Bereiche eine Warnüberschreitung, orange eine Richtwertüberschreitung und blau kennzeichnet den Normalbereich. Die Definition eines Richtwertes ist laut Deutsche Gesellschaft

⁵ EG VO 852/2004

⁶ Roth, 2021

für Hygiene und Mikrobiologie (DGHM) die folgende: „Richtwerte (Guidance Values) geben eine Orientierung, welches produktspezifische Mikroorganismenspektrum zu erwarten und welche Mikroorganismengehalte in den jeweiligen Lebensmitteln bei Einhaltung einer guten Hygiene- und Herstellpraxis zufriedenstellend sind. Proben mit Keimgehalten unter oder gleich dem Richtwert sind, unter mikrobiologischen Aspekt, grundsätzlich unauffällig⁷.“

Die Definition des Warnwertes ist laut DGHM die folgende: „Warnwerte (Critical Values) geben Mikroorganismengehalte an, deren Überschreitung einen Hinweis darauf gibt, dass die Prinzipien einer guten Herstellungs- und Hygienepaxis verletzt oder, dass z.B. das Haltbarkeitsdatum zu lange bemessen wurde. Bei einer Warnwertüberschreitung von pathogenen Mikroorganismen wie z.B. Salmonella und Listeria monocytogenes, ist eine Gesundheitsgefährdung des Verbrauchers nicht auszuschließen. Die Zusammensetzung des Lebensmittels, die weitere Zubereitung für den Verzehr sowie die Zweckbestimmung werden berücksichtigt. In der folgenden Abbildung sind die Richt- und Warnwerte, die für teilgarte Lebensmittel angenommen werden, zu sehen.

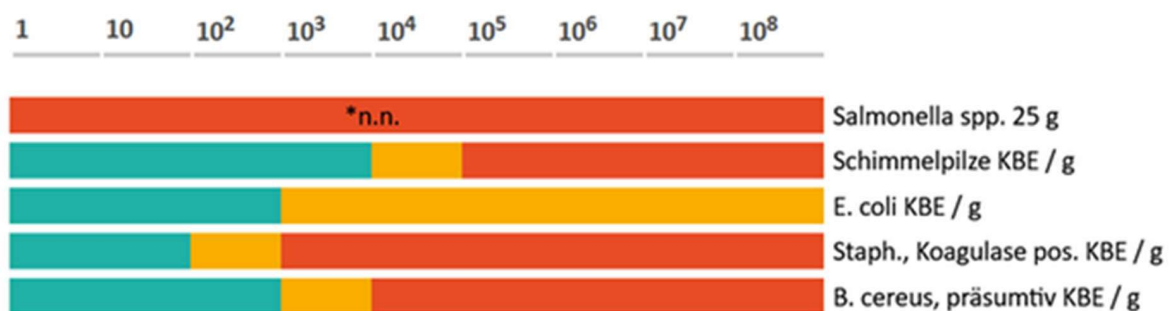


Abbildung 6-36: Mikrobiologische Grenzwerte⁷

6.3.6.5 Schutzmaßnahmen eines Lebensmittels

Um ein Lebensmittel vor dem Verderb zu schützen, können Hürdenkonzepte angewendet werden. Diese Hürdenkonzepte beinhalten verschiedene Parameter, um ein mikrobiologisch sicheres und stabiles Produkt herstellen zu können. Die folgenden Parameter können dabei bei dem Laugengebäck betrachtet werden:

- F-Wert (Summe aller letalen Wirkungen, die auf eine Mikroorganismenpopulation während der Erhitzung einwirken.?)
- aw-Wert (wie viel verfügbares beziehungsweise aktives Wasser steht Mikroorganismen in dem Lebensmittel zur Verfügung?)
- pH-Wert (kann durch den pH-Wert die Mikroorganismenvermehrung verlangsamt oder gar gestoppt werden?)

Bei einem Hürdenkonzept kann durch die Anwendung verschiedenster Parameter die Vermehrung von Mikroorganismen beeinflusst werden. Wenn also eine hohe Temperatur zum Backen genutzt wird, der aw-Wert möglichst niedrig gehalten wird und auch der pH-Wert möglichst weit von der 7 entfernt ist, kann im Sinne der Lebensmittelhygiene ein sicheres und stabiles Lebensmittel hergestellt werden⁸.

⁷ DGHM, 2018

⁸ Mack, 2019

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Tests werden in der folgenden Tabelle wiedergegeben:

	Nach der Herstellung [KbE/g]	Nach 14 Tagen [KbE/g]
Bacillus cereus	Negativ	695
Staphylococcus aureus	Negativ	Negativ
Gram positive Staphylokokken	Negativ	Negativ
Escheria Coli	Negativ	Negativ
Schimmelpilze	Negativ	Negativ
Gesamtkeimzahl	0	3950

Abbildung 6-37: Mikrobiologische Testergebnisse Beispiel Teig

Die Ergebnisse der darüber hinaus erfolgten sensorischen Prüfung des Gebäcks im frischen Zustand und im Alter von 14 Tagen sind aus der folgenden Tabelle ersichtlich:

	Frisch	Nach 14 Tagen
Aussehen äußeres	4	3
Aussehen inneres	5	5
Geruch	5	5
Geschmack	5	4
Farbe	4	3
Konsistenz	5	4

Abbildung 6-38: Ergebnisse Sensoriktest

Die Veränderungen in der Kategorie „Aussehen äußeres“ während der Lagerzeit bedeuten, dass die Oberfläche etwas an Glanz verloren hat, der im frischen Zustand noch etwas stärker wahrzunehmen war. Die innere Struktur des Gebäckes veränderte sich während der Lagerzeit nicht, sie war gleichmäßig mit gleichmäßig verteilter, kleiner Porenstruktur. Ebenso änderte sich der Geruch des Gebäckes während der Lagerzeit nicht, im aufgebackenen Zustand war der Geruch angenehm und für Laugengebäck typisch. Mit zunehmender Lagerzeit war jedoch eine leichte Veränderung des Geschmacks wahrnehmbar, das Aroma des Gebäckes war im Alter von 14 Tagen etwas weniger ausgeprägt als im frischen Zustand. Ebenso veränderte sich die Farbe während der Lagerzeit leicht, diese wurde leicht heller als für Laugengebäck typisch. Die Konsistenz des Gebäckes war im Alter von 14 Tagen etwas fester als im frischen Zustand, aber nicht zäh.

6.4 Produktbereich B: Hochviskose Massen

6.4.1 Übersicht

Die Arbeiten zum Produktbereich B basieren auf der beim industriellen Projektpartner J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck durchgeführten Analysen vgl. Abschnitt 6.2.2. Grundsätzlich sind auf Basis eines Digitalen Zwillings als Alternativen zur Ist-Situation mit konventioneller Schwefelform (0) vier Technologien relevant:

- 1) Form aus Kunststoff fräsen
- 2) Form im 3D Druck Verfahren erstellen
- 3) Marzipan direkt Fräsen
- 4) Marzipan 3D Druck

Dabei stellen 1) und 3) abtragende Fertigungsverfahren und 2) und 4) auftragende bzw. additive Verfahren dar. Bei allen abtragenden Verfahren ist die Abführung, Aufnahme und Wiederverwendung der Materialspäne zu berücksichtigen.

Außer bei der Ist-Situation sind im Digitalen Zwilling entweder als 3D Konstruktion oder als 3D Scan eine positive virtuelle Form und deren Entsprechung als Steuerungscode (im Allgemeinen G Code) abzubilden. Bei den Varianten 1) – 3) ist der Steuerungscode als virtuelle Negativform zu transformieren.

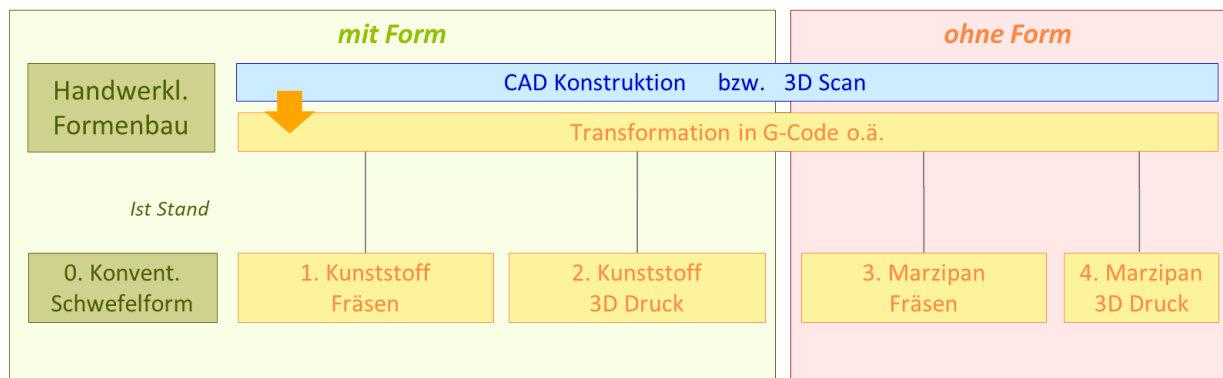


Abbildung 6-39: Alternativen für Produktgruppe B

Bei allen Varianten mit Form ist ein dreistufiger Prozess zu realisieren:

- I. Formenbau (Varianten 1 und 2)
- II. Formung (Manuell, Halbautomatisch, Extrudieren)
- III. Ausformen (Manuell, Automatisch)

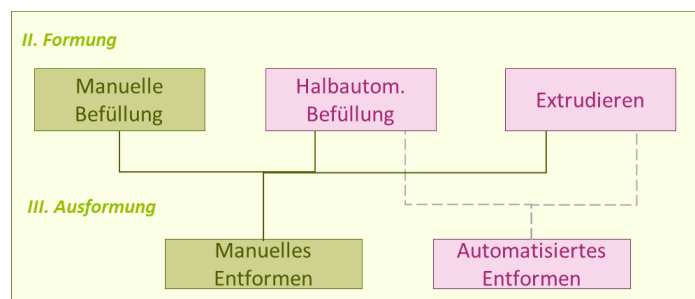


Abbildung 6-40: Varianten der Formung und Ausformung

Aufgrund der direkten Analogie zum und damit Übertragbarkeit der Erkenntnisse vom Produktbereich A) wird der 3D Druck von Maripanmasse nachfolgend vorangestellt.

6.4.2 3D Druck Marzipan

Die Grundsätzliche Verfahrensweise zum Drucken von Tortenauflegern aus Marzipan unterscheidet sich nicht von der Dekoration der Lebkuchen mit Royal Icing.

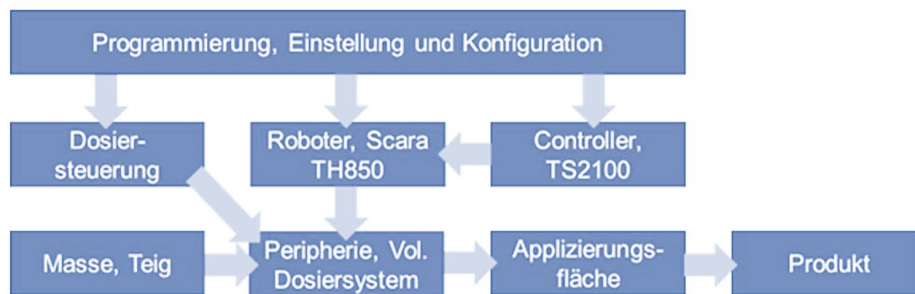


Abbildung 6-41: Schema 3D Marzipantortenaufleger

Entscheiden ist, dass die Marzipanmasse soweit verdünnt werden muss, dass eine Dosierung möglich ist. Gegenüber der standardisierten Grundmasse ist dies allein schon für die Förderung in der Viscotecpumpe erforderlich, aber kann je nach Feinheit des Dekors z.B. bei Einzelbuchstaben und Schriftzügen und der dafür notwendigen kleinsten Düsendurchmesser überproportional notwendig sein.



Erste Vorversuche zeigten deutlich auf, dass der Marzipan 3D Druck bei direktem Einsatz der Pumpe am Roboterarm (Versuchstand 1) technologisch besser beherrschbar und wesentlich ressourcenschonender (Marzipan ist deutlich wertvoller als Zuckerguss) als bei Anwendung eines verbindenden Schlauches zwischen stationärer Pumpe und bewegter Düse (Versuchstand 2) ist.

Anders als beim Royal Icing erwies sich die fehlende bzw. unzureichende Synchronisation (nur Ein- und Ausschalten möglich) der Roboterbewegung mit der Pumpenleistung hier als unkritisch. Ein Nachlaufen oder auch Nachtropfen ist nicht zu beobachten.

Die Bewegungsgenauigkeit des Scararoboters und damit die Reproduzierbarkeit des realen Formkörpers gegenüber der im Digitalen Zwilling abgelegten virtuellen Positivform (CAD -> Steuerungscode) erweist sich für alle untersuchten Referenzmodelle als ausreichend. Als erfolgslimitierender Faktor erwies sich hingegen die Düsengröße. Für eine hohe Trennschärfe sind kleinste Düsendurchmesser (mit hoher Masseverdünnung) erforderlich. Diese behindern aber die ansprechende Ausführung von flächigen Partien (erkennbare Segmentierung / Streifen).

Abbildung 6-42: 3D Druck von Tortenauflegern.

Es wurden zwei grundsätzliche Varianten untersucht:

- ✓ Getrennter Druck von flacher Rotunde und erhabenem Dekor
- ✓ Geschlossener Druck des gesamten Tortenauflegers.

Im ersten Fall ist durch unterschiedliche Düsen und Verdünnung die Produktion wesentlich effektiver zu gestalten und die Abbildungsqualität höher, aber die Montage beider Teile kritisch.



Abbildung 6-43: Varianten 3D Druck Marzipan

6.4.3 Formenherstellung (Fräsen und 3D Druck)

Für die Formenherstellung wurden sowohl ein abtragendes (zerspanendes) als auch ein auftragendes (additives) Herstellverfahren untersucht und verglichen. Dabei bietet die Realisierung des virtuellen Abbildes im Digitalen Zwilling (Transformationsebene vgl. Abschnitt 6.6.3 die volle Flexibilität, die identischen Formen (positiv und negativ) auf die beiden fertigungstechnisch grundverschiedenen Verfahren gleichermaßen optional aufzuschalten.

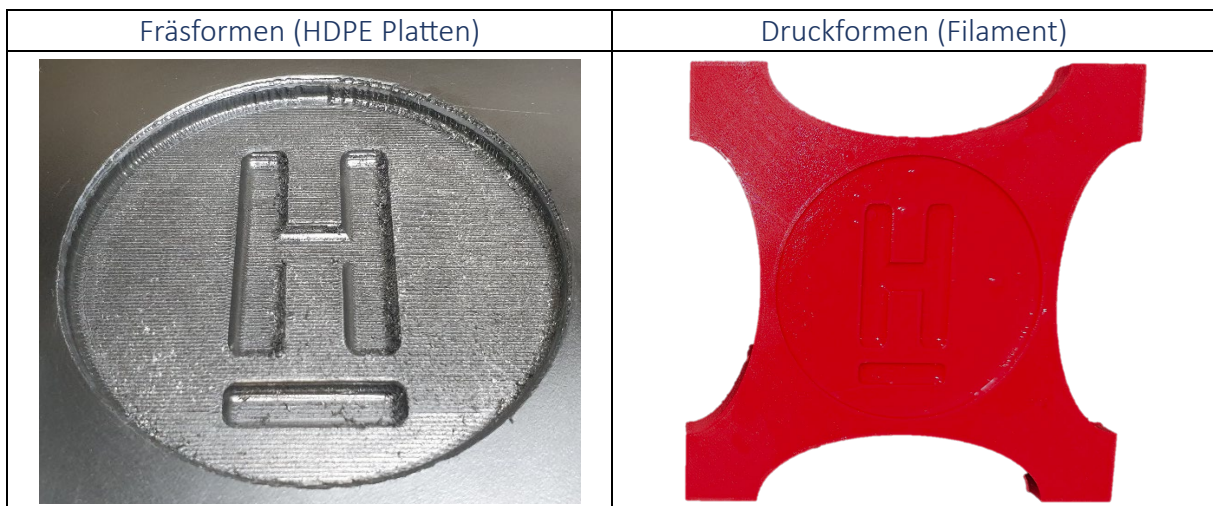


Abbildung 6-44: Vergleich gefräste und gedruckte Form

Bei beiden Verfahren ist die Optimierung darauf gerichtet, eine möglichst hohe Abbildungsgenauigkeit bei geringster Fertigungszeit zu erreichen. Im Projektzeitraum wurde bei beiden eine Reduzierung unter 30% der Anfangszeiten erreicht. Im Falle des 3D Druckes war dies darüber hinaus mit einer Materialeinsparung von bis zu 20% verbunden. Möglich wurde dies, nicht nur durch die im obigen Bild erkennbaren Aussparungen, sondern eine innere Wabenstruktur. Diese muss jedoch so gestaltet werden, dass der erforderliche Pressdruck der halbautomatischen Befüllung zu keiner Verformung führt.

In den Versuchen wurden sowohl die Soll- und die daraus resultierende Ist-Dicke als auch der eingesetzte Pressdruck optimierend variiert.

Marzipan						Fondant					
dicke	gewollt	gemessen	Kraft	Verhaltensweise	Bilder	dicke	gewollt	gemessen	Kraft	Verhaltensweisen	Bilder
21,67mm (-5mm)	=16,67mm	16,5mm	202N	Kanten sind nicht gut geformt und sehr leicht zu entnehmen	 Fräsform	19,56mm (-7,5mm)	=12,06mm	11,99mm	300N	Leicht zu entnehmen	 Fräsform
20,67mm (-7,5mm)	=13,17mm	13,03mm	390N	Kanten sind besser geformt und leicht zu entnehmen	 Fräsform	18,72mm (-7,5mm)	=11,22mm	11,28mm	400N	Leicht zu entnehmen	 3D Druck
20,32mm (-10mm)	=10,32mm	10,17mm	550N	Es klebt an der Fräsform und ist ein bisschen schwer zu entnehmen	 Fräsform	16,07mm (-10mm)	=6,07mm	6,04mm	900N	Leicht zu entnehmen	 3D Druck

Abbildung 6-45: Vergleich Tortenaufleger Marzipan und Fondant

Für den Erfolg des Fräsens der HDPE-Formen ist entscheiden, wie und mit welcher Software als Teil des Digitalen Zwillings die CAD-Konstruktion in einen effektiven G-Code transformiert wird, welche Fräswerkzeuge zum Einsatz kommen und welche Optionen zur Nachbearbeitung vorhanden bzw. erforderlich sind.

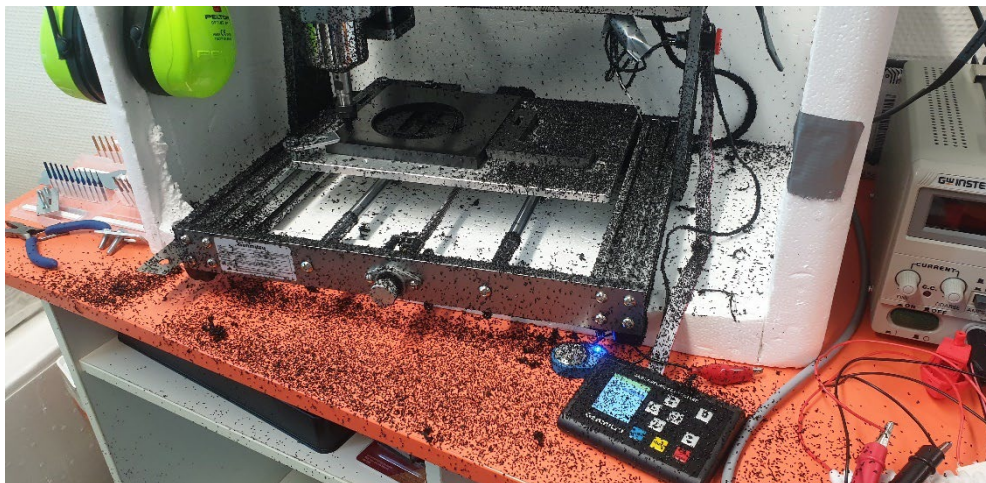


Abbildung 6-46: Fräsen von Formen aus HDPE-Platten

Die im Projekt eingesetzte 3D CNC-Fräse wurde labor- und förderprojektgerecht ausgesprochen kostenbewusst ausgewählt. Sie verfügt über keine Absaugung und es wurde nur ein rudimentärer Staubschutz eingesetzt. Eine sichere Trennung zwischen dem Lebensmittelbereich und dem Fräsprozess ist selbstverständlich! Dies gilt analog für den 3D Druck der Kunststoffformen, welcher prinzipbedingt keine Verunreinigung durch Späne, wohl aber eine Ausdünstung in höherer Konzentration kritischer Gase verursachen kann.

6.4.4 Extrudieren in 3D Form

Als Extruder wird gleichfalls die Viscotecpumpe am Versuchstand 1 genutzt. Die Marzipanmasse muss dafür stärker verdünnt werden als beim 3D Druck, damit sie insbesondere in der flachen DiKoRo Form ausreichend breit läuft und alle Bereiche vollständig füllt.

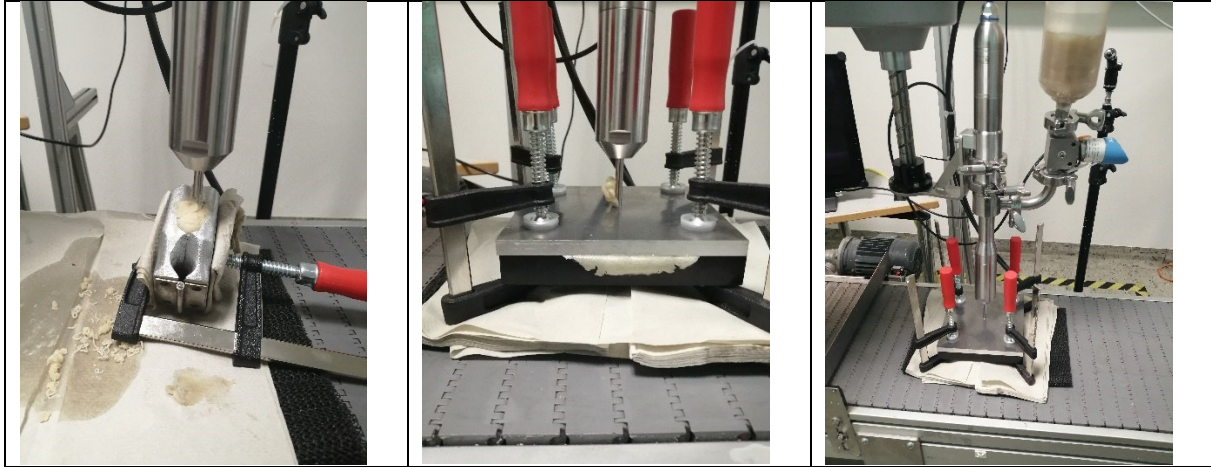


Abbildung 6-47: Versuchsaufbau zum Extrudieren



Nutzung einer historischen Gussform

Nutzung einer gefrästen Form mit Entlüftungslöchern

Abbildung 6-48: Extrudierte Marzipankorpuse

Eine Grundvoraussetzung ist die Existenz von Abführungsbohrungen über die, die von der Masse verdrängte, Luft entweichen kann. Extrudiert wird bis Masse aus den Entlüftungslöchern austritt. Die Anzahl, Position und der erforderliche Durchmesser sind von dem abzubildenden Dekor abhängig. Je größer umso weniger wird die Luft komprimiert und umso weniger wird die Masseverteilung behindert. Je größer sind aber auch die Stege mit Masse die sich herausbilden und u.a. die Entformung behindern.



Abbildung 6-49: Form mit Entlüftungsbohrungen für das Extrudieren

Eine besondere Herausforderung besteht sowohl beim manuellen Befüllen als auch dem Extrudieren in dem Ausformungsprozess. Die gewonnenen Erfahrungen sollten bei der Auswahl und Gestaltung der Auflieger-Dekore ausreichend Berücksichtigung finden, da wie schon in der Ist-Situation (Schwefelformen) ein hohes Ausschussrisiko (insbesondere Zeitverlust; Masse wird recycelt) gegeben ist.

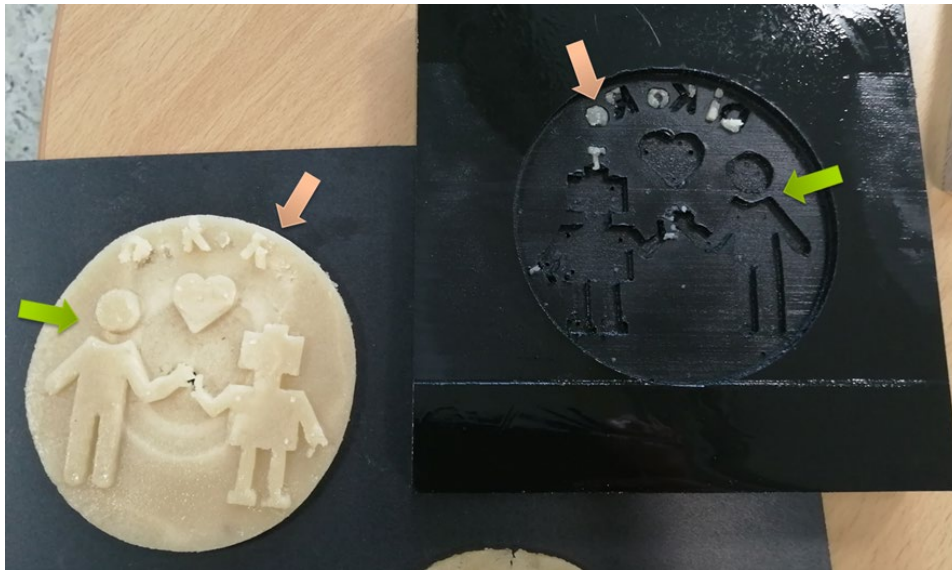


Abbildung 6-50: Beispiel Ausformungseffekte

Neben der Geometrie ist es überwiegend eine Frage der Materialpaarung zwischen Lebensmittelmasse und dem Material sowie der Oberflächengüte der Form. Aktuelle Arbeiten in Nachfolge des Projekts DiKoRo sind auf die weitere Optimierung dieser Aspekte gerichtet. Dabei werden auch feuchte und trockene Trennmittel untersucht.

6.4.5 3D Direktfräsen Marzipan

Im Projektverlauf stellte sich die Frage, ob es nicht möglich und sogar effektiver ist, dass im Digitalen Zwilling (als virtuelle positive Form) vorhandene Abbild (CAD-Konstruktion und G Steuerungscode) ohne den Umweg über eine physische negative Form zur Ausbildung der Marzipantorten zu nutzen.



Abbildung 6-51: Beispiele für das direkte Fräsen von Marzipanmasse

Diese Technologie, war zu Projektbeginn nicht üblich und im Betrachtungsfokus, steht damit noch am Anfang der Entwicklung und es sind noch viele lebensmitteltechnologische Fragen offen. Dazu gehören die Temperaturführung, das Auffangen und Wiederverwenden der abgetragenen Masse, die erreichbare Abbildungsqualität und Fertigungsdauer. Letztere könnte günstigenfalls unter der Herstellungszeit für eine Kunststoffform (HDPE) liegen, aber immer noch deutlich über der Ausformung mit einer vorhandenen Form. Damit ist dieses Verfahren auch bei weiterer Optimierung wirtschaftlich auf die Erstellung von Prototypen oder Kleinstmengen limitiert, wo sich keine Formenherstellung lohnt.

6.5 Kollaborative Robotik

Durchaus als wertvoller, so aber nicht geplanter und voraussehbarer Erkenntnisgewinn ist die Einschätzung zu bewerten, dass eine unmittelbare kollaborative Zusammenarbeit zwischen Bedienpersonal und Roboter im identischen Arbeitsraum sicherheitstechnisch und kostenseitig für den betrachteten Einsatzbereich nicht opportun ist. Genau dies wird auch von parallelen Entwicklungen in vielen anderen Branchen bestätigt.

Als erfolgversprechende Brückentechnologie erweist sich jedoch die direkte manuelle Ansteuerung des Roboter- und Dosiersystems über einen Gamecontroller und hat gegenüber einer konventionellen Teach-In Nutzung nachweisliche qualitative (Reaktionsfähigkeit auf variierende Untergründe und Viskositätsschwankungen der aufzutragenden Masse) und gegenüber der Vollautomatisierung mit Bilderkennung und geschlossenen Robotersystemen bei kleineren Stückzahlen erkennbare wirtschaftliche Vorteile.

Am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung wurde eine MRK-Taxonomie entwickelt, die die Zusammenarbeit nach Kooperationstypen (KT) unterteilt⁹, dabei ist die in der Hochschule am Versuchstand 2 erfolgende „teilmanuelle“ Steuerung der Kategorie Kooperationstyp 1 KT-1 zuzuordnen. Diese beschreibt Systeme, die den Mitarbeiter durch Kraftunterstützung entlasten oder wo die Bewegungsführung durch den Mitarbeiter der Programmierung dient.

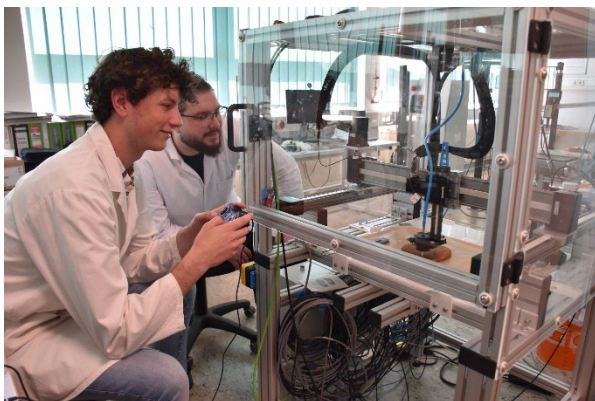


Abbildung 6-52: Kollaborative Arbeit mit Gamecontroller

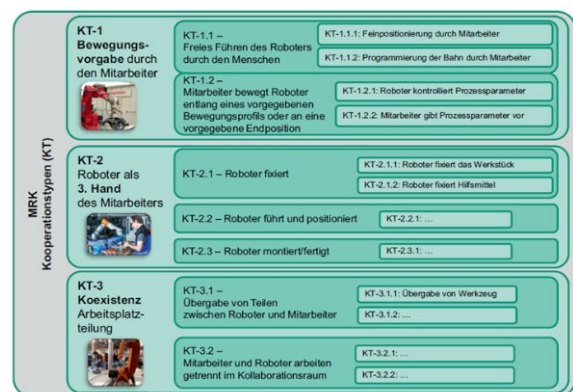


Abbildung 6-53: MRK Kooperationstypen⁹

Wesentlich Vorteile, sind der Wegfall der gesundheitlichen Belastungen mit den typischen Risiken (Rückenschmerzen, Bandscheibenvorfall und Sehnenscheidenentzündung) bei gleichzeitigem Erhalt der (kunst-) handwerklichen Ausführung und Qualitätsansprüche.

Dieser technologische Weg soll u.a. als Trainingssystem über das Projekt hinaus durch Entwicklungsarbeiten an der Hochschule fortgesetzt werden und auch in den Praktika der einschlägigen Bachelor- und Masterstudiengängen Anwendung finden.

⁹ DIETZ, T.; OBERER-TREITZ, S., 2015: Mensch-Roboter-Kooperation wirtschaftlich einsetzen. <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/mensch-roboter-kooperation-wirtschaftlich-einsetzen-a-497914/>.

6.6 Digitaler Zwilling

Das Konzept für den Digitalen Zwilling liegt schwerpunktmäßig im Arbeitsbereich des Projektpartners und Konsistorialführers SimPlan AG. Den technologischen Input erarbeitete das Team der Hochschule Hannover. Die gegenüber der konventionellen Simulation erforderlichen Schnittstellen zwischen Digitalem Zwilling und Maschinen (Roboter) bzw. Gerätetechnik wurden gemeinsam betrachtet. Hierbei ist das Engagement von Herrn Jan Haas erfolgsentscheidend. Während sich das Hochschulteam vorwiegend aus Lebensmittel- und Verpackungstechnolog*innen zusammensetzt, bringt Herr Haas als Masterstudent der Fakultät 1¹⁰ gleichermaßen innovatives wie konkret anwendungsbereites informationstechnisches, steuerungstechnisches und automatisierungstechnisches Know-How ein. Im Projekt übernahm er aufeinander aufbauende Rollen wie Hiwi-Tätigkeit, temporäre Mitwirkung als Projektmitarbeiter und Werksstudent im Auftrage der wirtschaftlichen Projektpartner.

Für das Projekt wurden zwei strategische Konzeptstrategien Web Solution und plattformübergreifende Entwicklung weiterentwickelt. Beide sind je nach Anwendungsfall sowohl unabhängig als auch vernetzt umsetzbar und hervorragend als Grundlage eines spezifischen Assistenzsystems geeignet.

6.6.1 Web Solution – Simulation in the Cloud

Diese Strategie setzt auf eine zentrale Serverlösung auf welche über Browserapplikationen zugegriffen wird. Der primäre technologische Vorteil liegt beim Anbieter bzw. Host. Während die volle Funktionalität (nur) auf der Serversoftware vorhanden und gewartet werden muss, senden die Nutzer ihre Daten via Web/Cloud zu und erhalten automatisierte Ergebnisdarstellungen. Aufgrund der Verfügbarkeit über diverse Webstores wie iTunes Store, Play Store (Android) oder Microsoft Store ist der Einsatz diverser Endgeräte möglich. Neben DiKoRo wird diese Strategie auch in weiteren Projekten der SimPlan AG¹¹ wie u.a. HyMo_Me, CloudFlow und MobiSim forciert.

Für den, im Projekt DiKoRo besonders relevanten, Einsatz von digitalen Zwillingen für Robotersysteme ist diese noch junge Technologie der „Simulation in the Cloud“ grundsätzlich erfolgsversprechend, aber im konkreten Einsatzfall bezüglich der Schnittstellen zur Robotersteuerung (vgl. Abschnitte 6.6.3) noch ausgesprochen eng limitiert.



Abbildung 6-54: Konzept Simulation in the Cloud und Schnittstellen Simulate3D¹²

Hingegen verfügt das auch im SimPlan Portfolio zugängliche Demo/Simulate/Emulate 3D der Fa. Rockwell Automation¹³ über umfangreiche steuerungstechnische bis hin zu roboterspezifischen Schnittstellen. Auch die Hochschule Hannover verfügt über eine Education Lizenz für dieses Tool und setzt es in den Lehrveranstaltungen der Systemoptimierung im Bachelor- und Masterstudium ein.

¹⁰ HS Hannover Fakultät Elektro- und Informationstechnik <https://f1.hs-hannover.de/>

¹¹ <https://www.simplan.de/forschung/>

¹² <https://www.simplan.de/software/>

¹³ Emulate3D develops Dynamic Digital Twin software <https://www.demo3d.com/>

6.6.2 Digitale Zwillinge als plattformübergreifende Entwicklung

Vom Projektteam der Hochschule Hannover wird die Entwicklung von Simulationssoftware und Digitaler Zwillinge auf Basis des FireMonkey Framework der Embarcadero Inc.¹⁴ favorisiert. Damit ist es möglich mit einer einzigen Quellcodebasis, plattformübergreifend für Windows, macOS, iOS, Android und Linux zu kompilieren. Diese Anwendungen sind 100 % nativ auf jeder dieser Plattformen. Der Vorteil gegenüber der Cloud Lösung ist, dass die Anwendungen auch offline voll funktionsfähig und keine Limitierung der Parameter- und Funktionsvielfalt durch Übertragungsmechanismen aufweisen. Dies ist auch ein wichtiger Freiheitsgrad bei der Erweiterung und Anwendungsfall bezogen, individuellen Anpassung.



Abbildung 6-55: Framework Konzept für Digitale Zwillinge

So wird u.a. der in der HS Hannover am Standort Ahlem (Bioverfahrenstechnik) für Forschung und Praktika verfügbare Delta Picker der Fa. Rovema¹⁵ (Roboter mit Parallelkinematik) über ein Linux Steuerungssystem programmiert. Die im Vergleich besonders schnelle Deltakinematik ist für den DiKoRo Produktbereich A hoch interessant und perspektivisch gegenüber den genutzten Toshiba Scara und Igus Portal Systemen mit dem auch wirtschaftlich höchsten Potential zu sehen. Die im Projektzeitraum verfügbare Dosiertechnik überschreitet aber bekanntermaßen das Lastlimit des vorhandenen Rovema-Systems.

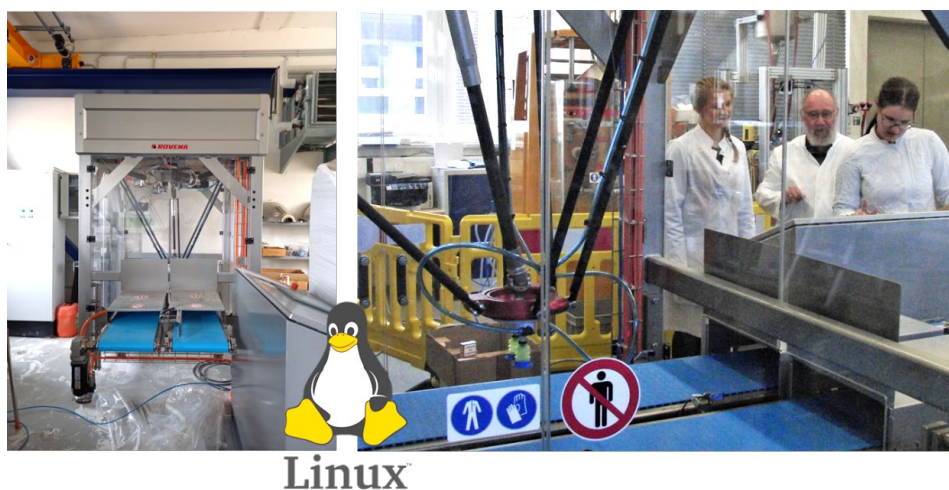


Abbildung 6-56: Parallelkinematik mit Linux Steuerung an der HS-Hannover

¹⁴ www.embarcadero.com/de/products/rad-studio

¹⁵ <https://www.rovema.com/verpackungsmaschinen/kartoniermaschinen/loeffelbeileger/>

6.6.3 Schnittstellen und Transformationsebene

Eine Vielzahl an Softwaresystemen bieten inzwischen Frameworks für maschinelles Lernen¹⁶. Zum Großteil sind diese schon mit vorgefertigten Algorithmen für Datenverarbeitung oder Bilderkennung ausgerüstet, teils gibt es schon bereits vortrainierte Modelle. Die Lizenzierung erfolgt meist über freizügige Open-Source-Lizenzen (BSD, MIT, Apache). Viele dieser Frameworks verarbeiten die Programmiersprache Python. Bei dieser handelt es sich um eine nutzerfreundliche und insbesondere bei Ingenieuren und Wissenschaftlern populäre Programmiersprache, die auf Open-Source-Basis verfügbar ist. Anfang 2019 war Python die meistverwendete KI-Programmiersprache auf der Softwareentwicklungsplattform github¹⁷.

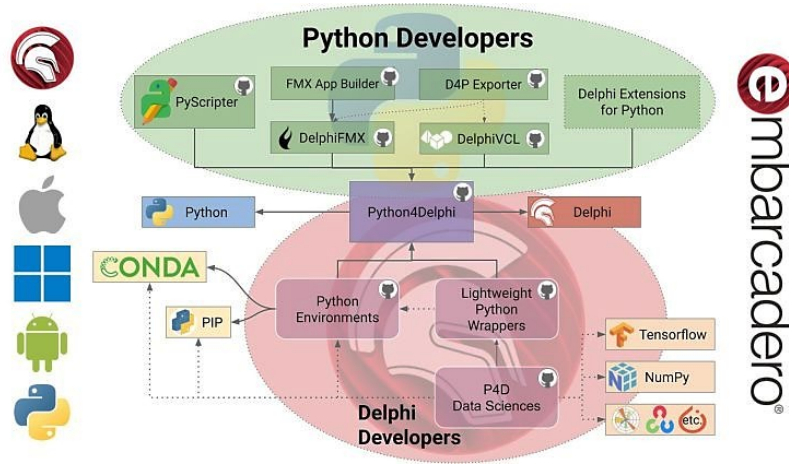


Abbildung 6-57: Python als universelle Schnittstellensprache¹⁸

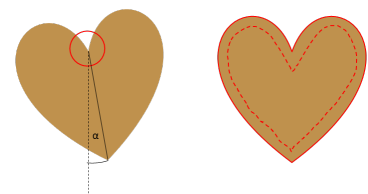
Darauf basierend ist als besonderer Kern des Digitalen Zwillings das von Herrn Haas erstellte und vom Projektteam erfolgreich getestete und umfangreich genutzte Pythonprogramm als Transformationsebene anzusehen, welches u.a. die Transformation der auf Basis der Bilderkennung erstellten Dekorationspfade in die sequentiellen Befehle der Robotersteuerung standardisiert und automatisiert (vgl. auch Abschnitt 6.2.1.3 mit der Erstellung eines Pythonprogrammes für die Bildauswertung zur Flächenbestimmung der Lebkuchenherzen). Analog ist diese Transformationsebene als effektive Schnittstelle zwischen diversen CAD Tools und den für den 3D Drucker und die CNC Fräse (G-Code) erforderlichen sequentiellen Steuerprogrammen unverzichtbar.

6.6.4 Bilderkennung

Wesentliche und erfolgreich realisierte Ziele der Bilderkennung sind:

- Lageerkennung
 - Erkennung Drehwinkel
 - Konturerkennung auf Basis Kontrast zwischen Untergrund und Objekt Ecken- und Kantenerkennung, Geometrie des Herzens
- Ermittlung eines Referenzpunktes
- Offset der Kontur als Grundlage für Randverzierung
- Berücksichtigung von Asymmetrien, Stauchungen und Streckungen in der robotergestützten Dekoration

(Fest gelernte Dummies bergen die Gefahr, dass ein unsymmetrisches Objekt nicht richtig erkannt wird)



¹⁶ STIMAC, M., 2018: So steigen Entwickler in Machine Learning ein. <https://www.golem.de/news/programmiersprachen-pakete-ides-so-steigen-entwickler-in-machine-learning-ein-1811-137463.html>

¹⁷ ELLIOTT, T., 2019: The State of the Octoverse: machine learning. <https://github.blog/2019-01-24-the-state-of-the-octoverse-machine-learning/>

¹⁸ <https://blogs.embarcadero.com/de/pytorch-for-delphi-with-the-python-data-sciences-libraries/>

Realisierte Aufgaben:

- Kalibrieren und Korrekturen der Kamera Optik und des Sensors
- Aufnahmen eines Kalibriermusters (Schachbrett) um die kameratypischen Verzerrungen des Bildes aufgrund der Optik und des Sensors zu kompensieren
- Konvertieren von Kamerapixeln in reale Koordinaten



Geräte:

Raspberry Pi mit HQ Kamera

Wesentliche Erfolgsfaktoren sind:

Sensorgröße, Blickwinkel und Objektive

Software:

Python mit der freien Programm-
bibliothek OpenCV für die Bild-
verarbeitung



Traverse:

um die Kamera vollständig außerhalb des
Bewegungsraumes des Roboters zu posi-
tionieren,

Abbildung 6-58: Bilderkennung am Versuchstand 1

Wie gemeinsam mit der Fa. Gerhard Schubert GmbH Crailsheim (projektbegleitende Unterstützung) durchgeführten Untersuchungen zeigen, sind auch freie Lagenbilder sowie Überlappungen, Umkehrungen bis hin zu Produktfehlern (Ausschuss) bei ausreichend trainierten Systemen (mit KI) sicher identifizierbar.

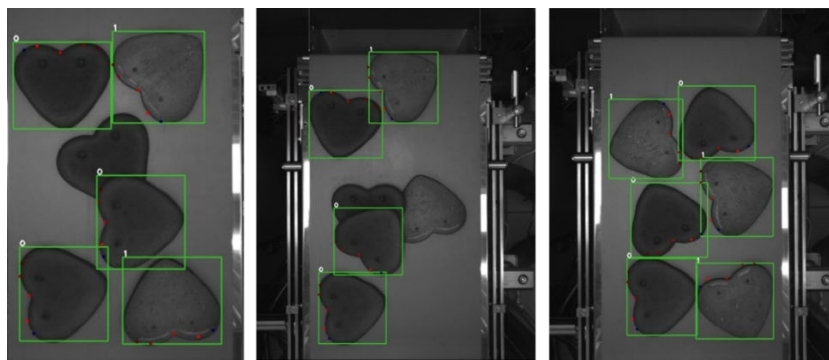


Abbildung 6-59: Beispiele Bilderkennung Position und Lage

Für die Anwendung bei handwerklich orientierten KMU wird jedoch keine Massenproduktion angestrebt und ist auch längerfristig von einer relativ geordneten Zuführung einzelner Produkte auszugehen. Für die verbleibende Erkennung leicht gedrehter Produkte mit ausskalierbaren Abweichungen von Größe und Symmetrie sind aus wirtschaftlichen Gründen die im HSH Labor getesteten einfacheren Systeme zu bevorzugen.

6.6.5 Produktionsstrategien: Layout- und Bedienkonzepte

Typische Fragestellungen von Simulationsstudien im Verpackungsbereich sind u.a. entsprechend dem DLG-Qualitätsatlas für Verpackung 2022¹⁹:

1. Planungsszenarien, Angebotsvergleiche und Potentialbestimmung,
2. Layoutvarianten, Ausbaustufen und erreichbare Linienleistung, einschließlich optimaler Auswahl, Anzahl, Verkettung und Steuerung von Maschinen,
3. Bestimmung und optionaler Austausch von Bottleneckmaschinen,
4. Auswirkungen von Hygiene-Raumklassen und Aseptiksystemen,
5. Vergleich Linien bezogene oder zentrale Palettierung,
6. Rüstzeitoptimierung auf Basis repräsentativer Auftragsfolgen,
7. Anzahl, Position und Kapazität von technologischen und Störungsspeichern,
8. Anzahl, Position und Aufgabenverteilung von Bedien- und Instandhaltungspersonal (einschließlich Wegezeiten und Priorisierung von Aufgaben),
9. optimale Kombination von manuellen Arbeitsplätzen, Maschinen und Robotik,
10. Energie- und Medienverbrauch in Abhängigkeit Layout- und Verkettungsvarianten, Steuerungslösungen und Produktionsstrategien,
11. Mittlere und max. Systembelastungen von Intralogistik und externer Logistik mit Varianten der Transportsysteme und Dimensionierung der Lager (bis hin zur Unterscheidung der Transportzeiten in Transversalbewegung in der Ebene, Heben und Senken, Rotation).

Insbesondere die Schwerpunkte 1, 2 und 6 -11 sind auch uneingeschränkt für Lebensmittelanlagen und die DiKoRo Systeme übertrag- und anwendbar, was die Einbindung der im SimPlan Portfolio verfügbaren Simulationssoftwaresysteme (PacSi, Emulate3D, OEEtoGo) fachlich ausgesprochen nahelegte. Diese Systeme respektive die damit durchgeführten Studien basieren auf der auch im Lebensmittelbereich anerkannten DIN EN 415-11:2021-12 zur Effizienzbestimmung und Inbetriebnahme (Abnahme).

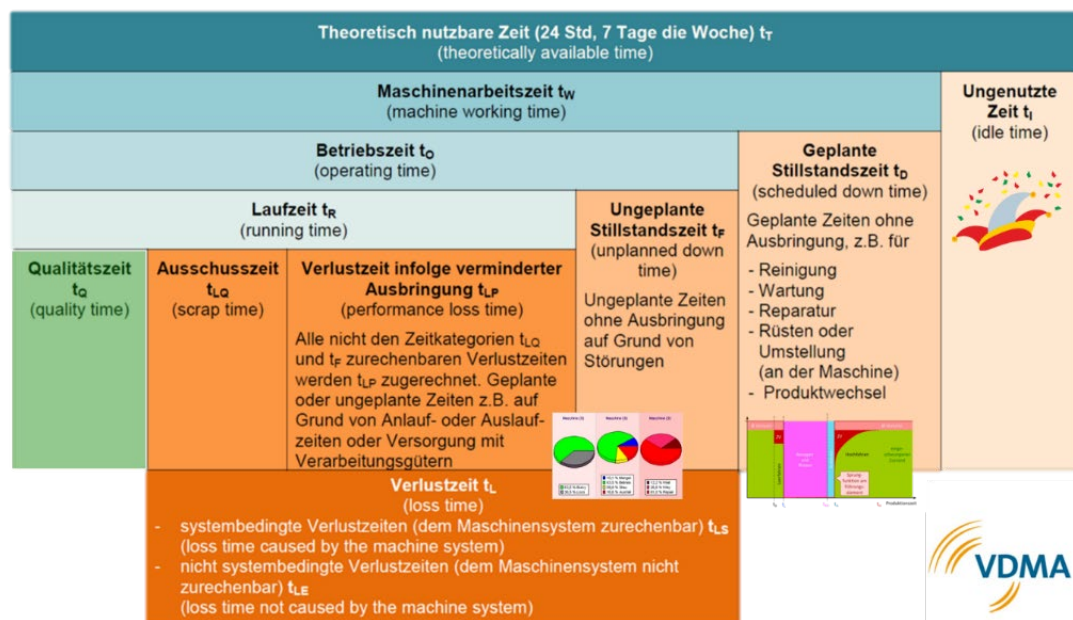


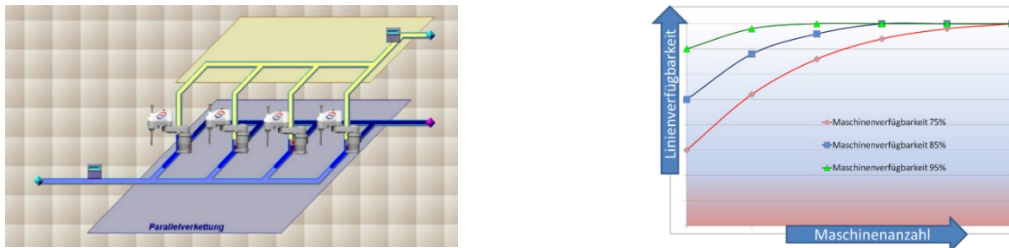
Abbildung 6-60: Zeitgliederung nach DIN EN 415-11:2021-12²⁰ (Darstellung VDMA Frankfurt)

¹⁹ DLG-Qualitätsatlas für Verpackung 2022 unter Federführung des DLG-Arbeitskreises Lebensmittelverpackung in der Supply Chain <https://www.dlg-verlag.de> 2024

²⁰ 2024 DIN Media GmbH

Für die perspektivische Nutzung der DiKoRo Systeme sind insbesondere die zwei Fragestellungen 7) Anzahl, Position und Kapazität von Speichern, aber an erster Stelle jedoch mit der vorhergehenden prozesslogisch verbunden 8) Anzahl, Position und Aufgabenverteilung von Bedien- und Instandhaltungspersonal (einschließlich Wegezeiten und Priorisierung von Aufgaben hoch relevant.

Robotereinsatz mit Parallelverkettung



Robotereinsatz mit Reihenverkettung



Abbildung 6-61: Beispielhafter Vergleich Parallel- und Reihenverkettung (PacSi²¹ SimPlan AG)

Insbesondere für den Produktbereich A) und den dort favorisierten 3D Lebensmittelruck steht die Frage, ob jeweils ein Robotersystem ein Produkt wie z.B. das Lebkuchenherz ggf. auch mit Wechsel der Masse (u.a. Farbe) und der Düse vollständig fertigt, oder ob mehrere Roboter hintereinander nur einzelne Prozessschritte (z.B. Randmuster, Beschriftung, unterschiedliche Farben) ausführen. Im ersten Fall ist die Leistung (Ausbringung) eng limitiert und es resultiert die Optimierungsaufgabe der Anzahl paralleler Systeme je nach Auftragsgröße. Gerade bei allen kollaborativen Systemen würde jedoch gegenüber der Handarbeit nicht die Anzahl benötigter Personen, wohl aber deren gesundheitliche Belastungen reduziert. Im zweiten Fall (sequentielle Produktion) ist eine Reduzierung der Arbeitskräfte möglich, aber eine höhere Abstimmung (Synchronisation) der Systeme erforderlich.

Da die grundsätzlich die Auftragslage, aber zunehmend auch die Verfügbarkeit von Personal, erheblichen - insbesondere auch saisonalen - Schwankungen unterliegt, sind diese Fragen nicht durch einmalige Simulationsstudien lösbar, sondern wird eine Entscheidungsunterstützung durch ein in das Assistenzsystem integrierte Simulation attraktiv.

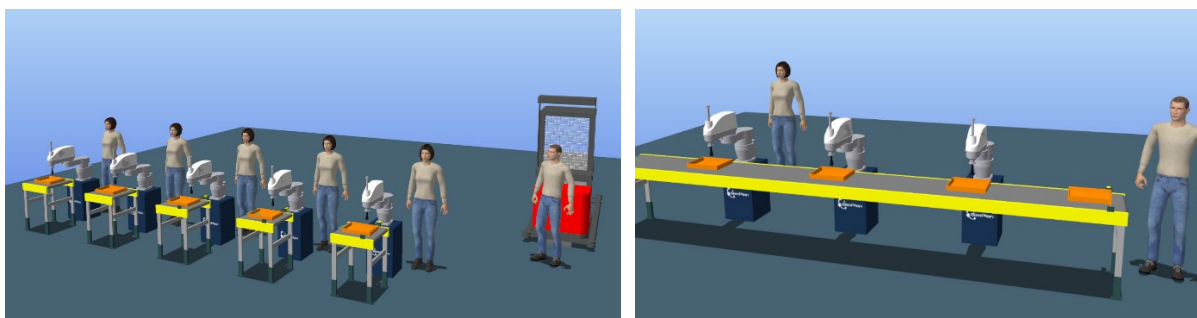


Abbildung 6-62: Konzept der parallelen und sequentiellen Produktion ©SimPlan (Emulate3D²²)

²¹ <https://www.pacsi.de/> PacSi | Simulationssystem für Verarbeitungs- und Verpackungsanlagen

²² <https://emulate3d.de/> Emulate3D - Software für die Virtuelle Inbetriebnahme

6.6.6 Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die untersuchten Robotersysteme unterscheiden sich gleichermaßen nach erreichbarer Qualität und Quantität der Produkte wie auch der davon abhängigen Investitions- und Betriebskosten.

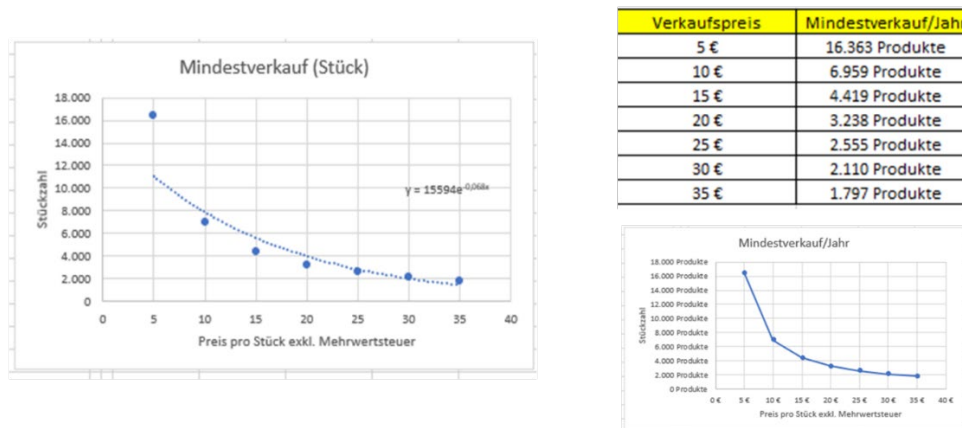
Kostenbetrachtung igus-System: Jahr 1		
*Sachkosten Materialien igus	26.243	EUR
Einrichtung Schaltschrank	2.600	EUR
Softwarelizenzen	4.700	EUR/Jahr
Weiterbildungskurse (Siemens)	1.000	EUR/Jahr
Erste Summe	34.543	EUR
+ Montage- und Installationskosten	500	EUR
+ Kosten für Aufrechterhaltung Betrieb	1.000	EUR/Jahr
Zweite Summe	36.043	EUR
Kostenbetrachtung igus-System: Jahr 2		
Softwarelizenzen	4.700	EUR/Jahr
Weiterbildungskurse (Siemens)	1.000	EUR/Jahr
Erste Summe	5.700	EUR
+ Kosten für Gewährleistung Betrieb	1.000	EUR/Jahr
Zweite Summe	6.700	EUR
Gewährleistung Betrieb		
Energie, Strom, Ersatzteile, Wartung, Reparatur,...		
Davon variabel: Ersatzteile, Reparatur. Davon fix: Strom, Wartung		
-> Je mehr Betrieb, desto höher Verschleiß/Abnutzung		

Kostenbetrachtung Scara-System: Jahr 1		
*Sachkosten Scara-System	54.010	EUR
Einrichtung Schaltschrank	2.600	EUR
Softwarelizenzen	4.700	EUR/Jahr
Weiterbildungskurse (Siemens)	1.000	EUR/Jahr
Erste Summe	62.310	EUR
+ Montage- und Installationskosten	500	EUR
+ Kosten für Gewährleistung Betrieb	1.000	EUR/Jahr
Zweite Summe	63.810	EUR
Kostenbetrachtung Scara-System: Jahr 2		
Softwarelizenzen	4.700	EUR/Jahr
Weiterbildungskurse (Siemens)	1.000	EUR/Jahr
Erste Summe	5.700	EUR
+ Kosten für Gewährleistung Betrieb	1.000	EUR/Jahr
Zweite Summe	6.700	EUR

*Kosten Scara und igus-System		
inkl. Kosten für Kamera, Dispenser, Dosiernadeln, Kleinmaterialien		
Kostenunterschied igus & Scara/Toshiba: 27.767 €		

Abbildung 6-63: Beispiel Kostenvergleich der Robotersysteme [Projektmitarbeiter M. Trusheim]

Überblick Mindestverkaufsmenge abhängig vom Verkaufspreis im ersten Jahr



Überblick Mindestverkaufsmenge abhängig vom Verkaufspreis: Vergleich Jahr 1 und 2

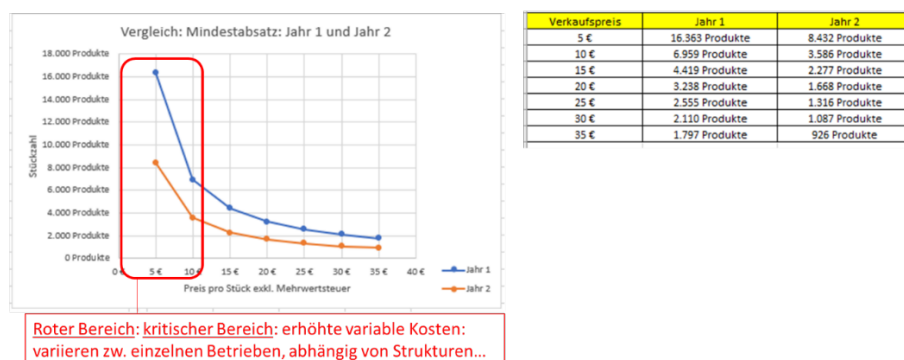


Abbildung 6-64: Beispiel Kalkulationen der Mindestverkaufsmenge pro Stück/Jahr

Alle betriebswirtschaftlichen Überlegungen sind geeignet, in einem den Digitalen Zwilling integrierenden Assistenzsystem, die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Dabei sind weniger die beispielhaften Zahlenwerte der Kostenfaktoren, sondern die Kalkulationsmethoden wesentlich.

6.6.7 DiKoRo – Gesamtkonzept / Digitaler Zwilling / Assistenzsystem

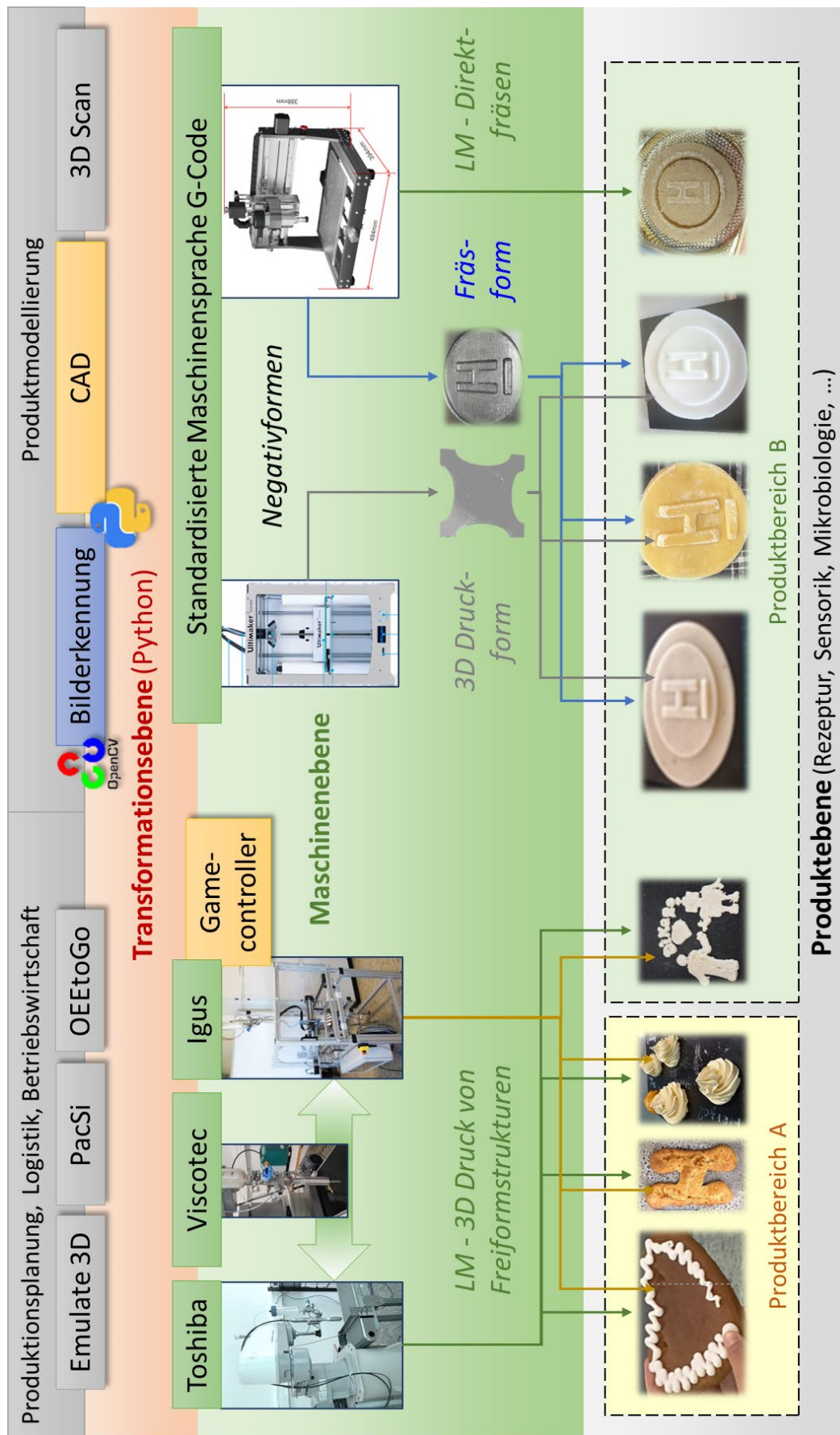


Abbildung 6-65: DiKoRo Gesamtschema Digitaler Zwilling

7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses



Abbildung 7-1: Übersicht über die Ergebnisse

Für alle gemeinsam mit den industriellen Projektpartnern ausgewählten und analytisch sowie experimentell untersuchten Varianten kann die prinzipielle Machbarkeit entsprechend des Technologischen Reifegrades TRL 4 als sicher nachgewiesen gelten! Nachfolgend wird eingeschätzt wie hoch das technologisch – wirtschaftliche Potential, aber auch der verbleibende, erforderliche Aufwand bis zur industriellen Einsatzreife nach TRL 9 zu erwarten sind:

	Machbarkeit TRL4	Potential	Aufwand bis TRL9
Lebensmittel 3D Druck mit Roboter und Dosierpumpe			
A) Royal Icing	↗ nachgewiesen	↗ sehr hoch	↗ hoch
B) Teig	↗ nachgewiesen	→ gut	↗ hoch
C) Kart.-Püree	↗ nachgewiesen	→ gut	→ mittel
D) Marzipan	↗ nachgewiesen	↘ nur für einfache Geometrien	↗ hoch
Einsatz von 3D Formen für Lebensmittel (Kunststoff geformt und 3D Druck)			
E) Marzipan	↗ nachgewiesen	↗ sehr hoch	→ mittel
F) Teig	↗ nachgewiesen	↗ sehr hoch	→ mittel
G) Fondant	↗ nachgewiesen	↗ sehr hoch	→ mittel
Lebensmittel 3D direkt geformt			
H) Marzipan	↗ nachgewiesen	→ gut	↗ hoch

Zu Variante A) Hier setzten insbesondere die technischen Möglichkeiten der Hochschule und die finanziellen Limits der Förderung (bezüglich Sachinvestition) enge Grenzen. Die mehrdimensional herausfordernden Parameter von Royal Icing erfordern den Einsatz einer im Projektzeitraum auch Corona bedingt, nicht verfügbaren Synchronisationsmöglichkeit von Roboter und Pumpe und legen die Entwicklung einer ganz speziell angepassten Dosiertechnik nahe, um das intuitive Regelungsverhalten und die sensorische Feinfühligkeit der menschlichen Hand ausreichend reproduzierbar nachbilden zu können!

8 Planungen für die Zukunft- im Sinne des fortg. Verwertungsplans

8.1 Hochschule Hannover

An erster Stelle erfolgt die aktuelle und perspektivische Verwertung bezogen auf das personalisierte Wissen der in das Projekt involvierten Mitarbeiter- und Mitarbeiterinnen. Diese tragen das im Projekt aufgebaute bzw. erweiterte Kno-How und die trainierten Fähigkeiten und Fertigkeiten weiter an ihre künftigen Arbeitsbereiche. Dort erweisen sie sich sprichwörtlich als „Kristallisationskeime der Digitalen Transformation“. Konkret können schon jetzt folgende erfolgreiche Berufswege benannt werden:

Herr Johannes Horaz Möllers, studierte in der Abteilung Bioverfahrenstechnik Fakultät Maschinenbau Lebensmittelverpackungstechnologie und war sowohl im vorhergehenden BMEL Projekt VoReVe als auch im aktuellen Projekt DiKoRo befristeter Projektmitarbeiter. Aufgrund seines dabei erworbenen Wissens und des gezeigten Engagements konnte er vorfristig auf eine Stelle im zentralen Team Kommunikation und Marketing übernommen werden. Dies ist eine auch für uns entscheidende Stabsabteilung als Ansprechpartnerin rund um Presse, Öffentlichkeitsarbeit und Hochschulmarketing an der HSH.

Frau Sophie Heinemann absolvierte ihr Masterstudium Milch- und Verpackungswirtschaft an der Hochschule Hannover mit hervorragendem Erfolg. Im Rahmen des Projektes DiKoRo schloss sie ihre Masterarbeit beim industriellen Projektpartner J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck mit ausgezeichnetem Erfolg ab und wurde vom Unternehmen unmittelbar übernommen. Sie ist im Unternehmen für Nachhaltigkeit und Verpackung in verantwortlicher Position und für den Projektabschluss und schon gestartete weitere, gemeinsame technologische Nachfolgeentwicklungen tätig.

Nach dem erfolgreichen Studium der Lebensmittelverpackungstechnologie an der Hochschule Hannover absolvierte Herr Reiko Wendorf beim industriellen Projektpartner Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen seine Bachelorarbeit, führte das Studierendenteam der Master Lehrveranstaltung „Interdisziplinäre Projektarbeit“ bei vergleichenden Untersuchungen (3 Druck mit Hefeteig) mit dem Versuchstand 1 an und fertigte beim Projektpartner J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck im Rahmen von DiKoRo eine ausgezeichnete Masterarbeit an. Aufgrund seiner besonderen Expertise wurde er im Verlängerungszeitraum als Projektmitarbeiter direkt in DiKoRo eingebunden. Er bringt seine hervorragenden Erfahrungen zur Digitalen Transformation seit Projektabschluss bei einem renommierten Snack Markenartikler ein.

Die befristet und zu 50% im Team der Lebensmittelverpackungstechnologie mitwirkende technische Mitarbeiterin (Haushaltsstelle) Frau Jessica To wechselte zum Projektende auf eine unbefristete Vollzeitstelle im projektrelevanten Backgewerbe.

Herr Jan Haas wirkt in DiKoRo als Automatisierungsspezialist an entscheidender Position mit. Angefangen mit Hiwi Status über eine einjährige 50% Stelle im Projekt sowie als Werksstudent des Projektpartners SimPlan AG unterstützt er das gesamte Team parallel zu seinem Studium. Auch nach Abschluss von DiKoRo wurde Herr Haas für weiterführende gemeinsame Entwicklungsarbeiten vom industriellen Projektpartner J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck als Werksstudent gewonnen und wird aufgrund seiner unverzichtbaren Expertise von diesem und/oder der SimPlan AG ein Masterthema angeboten bekommen.

In Nachfolge von Frau Knebelsberger (wechselte zurück zum Bereich Technologie Wachsende Rohstoffe) unterstützt Herr Dr. Dirk Hoffmann das Team intensiv bei der Projektbearbeitung. Auf Basis seiner unbefristeten 100% Hochschulstelle wird er die Erkenntnisse sowie ganz konkrete Fertigkeiten und Fähigkeiten bei der Nutzung der DiKoRo Systeme aus dem Projekt in das ab 9/2025 geplante neue Curriculum „Future Food Systems - Lebensmitteltechnologie und Verpackungstechnologie“ (Bachelor und Master) einbringen.

Die Versuchsstände und das gewonnene Know-How finden Eingang in die Lehrveranstaltungen des in Aufbau befindlichen neuen Curriculums „Future Food Systems - Lebensmitteltechnologie und Verpackung“ (ab 09/2025)

- Bachelor Vorlesung Maschinenfunktionen und Verarbeitungsvorgänge
- Bachelor Optimale Lebensmittel- und Verpackungsanlagen
- Master Analyse und Optimierung von Lebensmittelprozessen

Bezüglich der im Projektzeitraum weder geplanten, noch zeitlich und finanzielle (weitere, angepasste Dosiertechnik erforderlich) möglichen Übertragung der Ergebnisse von Scara und Portalsystem auf das vorhandene, wesentlich schneller Robotersystem mit Parallelkinematik (Delta Roboter mit Linux Steuerung) wurden erfolgsversprechende Kontakte zu Automatisierungsbereichen der Universität Braunschweig gewonnen.

Die Hochschule Hannover steht allen industriellen Projektpartnern weiterhin gern unterstützend zur Seite. Mit den Unternehmen J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck und SimPlan AG Hanau laufen aktuelle Nachfolgethemen bzw. finden sich konkret in Vorbereitung.

8.2 SimPlan AG Hanau

Herr Beyer bringt seine im Projekt weiter angewachsene Expertise als Lehrbeauftragter in der Hochschule Hannover und an der TU Dresden sowie in zahlreichen Industrieseminaren ein.

Für das branchenbezogen breit aufgestellte Gesamtunternehmen erweisen sich die DiKoRo Arbeiten als wertvolle fachliche Erweiterung der im Projekt genutzten Simulationstools (PacSi und Emulate3D) und damit des Gesamtportfolios des Unternehmens und finden damit Eingang in die Akquisition und Durchführung künftiger Forschungs- und Industrieprojekte.

Eine zunächst am 01.01.2020 im Rahmen des Projektes an der Niederlassung Dresden geschaffene und befristete Arbeitsstelle für die Abwicklung von Projektdienstleistungen wurde nach einer nochmaligen Verlängerung der Befristung im Rahmen des Projektes wie geplant zum 01.01.2022 entfristet. Zugleich wurde in der Niederlassung Dresden mit Hilfe einer studentischen Arbeitskraft (Werkstudentenvertrag) Entwicklungsunterstützung Kapazitäten im Bereich Simulator-Entwicklung geschaffen. Ziel ist es, bei absehbarem Markterfolg des weiterentwickelten Simulationssystems dauerhaft eine weitere Entwicklerstelle am Standort aufzubauen.

8.3 J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck

Das Unternehmen J. G. Niederegger GmbH & Co. KG Lübeck und die Hochschule Hannover führen in Nachfolge des Projektes DiKoRo gemeinsame Untersuchungen zur Umsetzbarkeit und forcierten Automatisierung durch. Diese Aktivitäten sind aktuell an die Bachelor Lehrveranstaltung Lebensmittelverpackungstechnologie im 6. Semester und die Vergabe eines Werksstudentenvertrages an Herrn Jan Haas angebunden. Eine Bachelor- bzw. Masterarbeit befindet sich in Vorbereitung. Ziel ist es, die erforderlichen Entscheidungen über auf DiKoRo aufbauende künftige Entwicklungsarbeiten zu quantifizieren. Dabei stehen neben der Hochschule Hannover auch weitere Hochschulen bzw. Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie maschinenbauliche Partner mit Roboterexpertise in Überlegung.

8.4 Heinrich Schulze Ladencafé GmbH Borgholzhausen

Für das Unternehmen Heinrich Schulze Ladencafé die Verwertung der Projektergebnisse von DiKoRo primär auf die Unterstützung der Entscheidungsfindung gerichtet, wann und in welchen Teilschritten eine Automatisierung einzelner Prozessschritte technisch/technologisch sinnvoll und wirtschaftliche umsetzbar ist. Die erreichten - auch gemessen an der Corona Situation im Projektzeitraum - akzeptablen und fachlich interessanten Ergebnisse weisen - anders als zu Projektbeginn erhofft - für die konkreten Prozesse des industrielle Projektpartners keine unmittelbare Umsetzbarkeit aus. Für weitere gemeinsame Schritte steht insbesondere die Hochschule Hannover jederzeit gern zur Verfügung.

8.5 Ingenieurbüro Rolf Peters Bad Zwischenahn

Aufgrund der im Projekt DiKoRo und parallelen Industrieprojekten ergänzten und bestätigten Expertise zum gleichermaßen innovativen wie effektiven Robotereinsatz steht Herr Rolf Peters bzw. sein Ing. Büro den Projektpartnern auch weiterhin bei Bedarf beratend zur Verfügung. Die gewonnen Erkenntnisse zum speziellen Einsatzbereich finden Eingang in sein seit dem Konsortium der Robotik-Pak-Line ständig erweitertem fachlichen Netzwerk. Darüber hinaus engagiert sich Herr Peters intensiv für die Qualifikation von Robotik Fachkräften und bringt dazu die DiKoRo Erfahrungen insbesondere in gemeinsame Aktivitäten mit dem Bildungsträger IQ Bremen ein.

8.6 Lupeg GmbH Pegnitz

Im Unternehmen Lupeg GmbH Pegnitz ist die perspektivische Nutzung der bei DiKoRo gewonnenen Sichtweisen und Erfahrungen insbesondere auf deren Transformation auf analoge Vorgänge für hochviskose technische Dosiergüter gerichtet.

9 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Als repräsentative Quelle für den Fortschritt auf dem Gebiet der Robotik in der Lebensmittelindustrie kann der DLG-Trendmonitor²³ (<https://www.dlg.org/de/lebensmittel/themen/publikationen/trendmonitor/dlg-trendmonitor-lebensmitteltechnik-2023>) herangezogen werden. Im aktuellen, vierten (seit 2014) Trendmonitor wird festgehalten:

„Auf den – nach viel zu langer Corona-Zeit – endlich wieder erlebbaren Fachmessen sind die spannendsten Fragen nicht mehr: „Wer kann das?“ oder „Wie geht das?“. Selbst „Was kostet das?“ rückt in den Hintergrund gegenüber der kaum seriös zu beantwortenden Frage „Wann können sie bzw. wir liefern?“.

Während optimistisch zu erwarten ist, dass die Verfügbarkeit von Steuerungschips, AD-Wandlern und anderen, bisher oft als selbstverständlich betrachteten, aber aktuell kaum beschaffbaren Komponenten über kurz oder lang wieder anwächst, sind es zwei Ressourcen, deren Endlichkeit schmerzhaft anhalten wird: Energie und menschliche Arbeitskraft.

Während Ersteres trotz Leichtbau und optimierten Bewegungsfunktionen auch im Roboterbereich eine ernst zu nehmende Herausforderung darstellt, ist Automatisierung unbestritten ein wesentlicher „Teil der Lösung“ bezüglich des zunehmenden Arbeitskräftemangels. Hier rücken immer wieder neue kollaborative Systeme in den Blick. Oft stellen sich diese aber eher als interessante Brückentechnologie bis zur Vollautomatisierung dar. Grund sind die extremen Sicherheitsanforderungen und die eng begrenzte Ausbringung, welche die Kosten im oberen Produktionsbereich unrentabel ansteigen lassen.

Gut, dass komplexe und autarke Komplettsysteme sowohl im Kosten- als auch Produktionsbereich hervorragende Alternativen bieten. Das grundsätzliche Know-how für die Auswahl und den Betrieb derartiger Lösungen ist nicht nur bei allen Anbietern, sondern zunehmend auch bei vielen Nutzern im Lebensmittelbereich vorhanden.“

Dies bestätigt die vom Projektkonsortium DiKoRo getroffenen Einschätzungen und erreichten Ergebnisse.

Auch die im Projektantrag getroffene Aussage:

²³ Carola K. Herbst, stellvertretende Geschäftsführerin Fachzentrum Lebensmittel, DLG e.V., C.Herbst@DLG.org
In Zusammenarbeit mit dem DLG-Arbeitskreis Robotik in der Lebensmittelherstellung

„Die meisten Roboter in der gesamten Supply-Chain der Lebensmittelherstellung erfüllen nach wie vor Handling-Aufgaben sog. „Pick and Place“²⁴. Das größere technologische und wirtschaftliche Potential wird aber für Systeme erwartet, die nicht nur „Ordnen und Fördern“ als Vorgänge ohne Stoffveränderung, sondern verarbeitungstechnische Aufgaben mit Stoffveränderung ausführen, wie das Trennen, Formen, Fügen und Dosieren durch vom Roboter bewegte Arbeitsorgane (Effektoren)²⁵. So stellt innerhalb des Gesamtspektrums der individualisierten Lebensmittelproduktion die individuelle Ausstattung und Dekoration von Back- und Süßwaren einen eigenständigen, hoch anspruchsvollen Prozessschritt dar, welcher die synchron überlagernde Realisierung der Vorgänge Dosieren, Fügen und Formen erfordert.

Werden in die Recherche auch alle vom Marketing getriebenen Publikationen hinzugezogen, so könnte sofort der Eindruck entstehen, die im Projekt angestrebte Lösung ist doch schon lange verfügbar. Stellvertretend seien hier die Veröffentlichungen von oder in Bezug zum Einsatz der zum lebensmitteltechnologischen High-End Bereich der Dosierung gehörenden Excenterschneckenpumpen der ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH Töging a. Inn²⁶ im Detail betrachtet. Richtig ist, dass die vorgenannten Excenterschneckenpumpen eine, wenn auch im Vergleich zu anderen Pumpen (wie z. B. der FILL-Systems GmbH Dresden²⁷) ausgesprochen kostenintensive, aber lebensmitteltechnologisch nahezu ideale (produktschonend, höchste Präzision) Komponente zur Dosierung von mittel- bis hochviskosen Flüssigkeiten darstellen. Die neueste Version verfügt über ein optimiertes Hygienic Design. Sowohl die Pumpen von Fill-Systems (ehemals Nassenheider) als auch ViscoTec sind im Verpackungstechnikum der Hochschule Hannover.

Neben Publikationen des renommierten Komponentenlieferanten ViscoTec wird u. a. auch bei den Systemintegratoren Unifiller Systems Inc. (US), Vasma Robotics (CH) sowie 3Desserts Graphique (F)²⁸ der Einsatz der Excenterschneckenpumpe zum robotergestützten Dekorieren in Text, Bild und Video demonstriert. Last not least hat der Projektpartner Ing.-Büro Rolf Peters Bad Zwischenahn & Bremen in den letzten Jahren vergleichbare und weil ohne Prozessmodell der Lebensmitteltechnologie realisiert mit instabilen Ergebnissen nicht praxissichere Versuchsreihe betreut.

Die Idee als solche ist also nicht neu und der Bedarf wird auch durch diese Veröffentlichungen bestätigt, aber die Umsetzung ist bisher bis auf vermutete Ausnahmen (die offensichtlich keine Freigabe zur Veröffentlichung haben) in der Lebensmittelproduktion nicht zur professionellen Anwendung gekommen ...

Auch anderweitig wurden diesbezügliche Ideen und Versuche schon reichlich publiziert (oft als Messemodelle zur Demonstration der Leistungsfähigkeit von Robotern, Pumpen und Bilderkennung oder als Ergebnis von Ideenschmieden kreativer Jugend) - am Markt verfügbar ist aber noch immer nichts praktisch Nutzbares bzw. im KMU-Bereich auch wirtschaftlich

²⁴ NACIRI, A., 2019: Systematik und Vergleich von aktuellen und perspektivischen Einsatzvarianten für Robotik über die gesamte „Supply Chain“ der Lebensmittelherstellung

²⁵ HESSE, S.; MALISA, V., 2010: Taschenbuch Robotik - Handling - Montage. Mit 7 Tafeln und 34 Tabellen, 1. Aufl. München: Carl Hanser Fachbuchverlag

²⁶ VISCOTEC PUMPEN- U. DOSIERTECHNIK GMBH, 2015: Kekse perfekt verzieren!

²⁷ FILL-SYSTEMS GMBH, o. J.: Datenblatt: Fillogy Flowable S (Art. 301019). <https://de.fillogy.com/wp-content/uploads/2019/06/Datenblatt-Fillogy-Flowable-S-Art.-301019.pdf>

²⁸ 3DESSERTS GRAPHIQUES, o. J.: Accueil - 3Desserts Graphiques Impression 3D alimen-taire. <https://www.3dessertsgraphiques.fr/>

einsetzbares. Dies spricht ... keinesfalls gegen die im Mittelpunkt der Publikationen stehenden Komponenten, aber ist primär auf das schon hervorgehobene Fehlen eines übergreifenden Prozessmodells und dafür notwendigen Know-hows der Lebensmitteltechnologie zurückzuführen.“

ist nach wie vor gültig, da keines der anderen Systeme auf einer vergleichbar umfassenden interdisziplinären Basis aufbaut und eine vergleichbare Übertragbarkeit wie DiKoRo erreicht.

10 Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Das Projekt DiKoRo fand unmittelbaren oder fachlich zitierenden Bezug u.a. bei:

- 11/2020 "Process knowledge, simulation and calculation ensure success with Robotics" Gemeinschaftsvortrag Beyer, K. (SimPlan AG); Weiß, M. (Hochschule Hannover); Food Industry Technology Show Korea Seoul
- 08/2021 „Projekt DiKoRo“ Trusheim, M. (HS Hannover) Fish International Bremen
- 12/2021 „DiKoRo digitales Prozessmodell am Beispiel Kollaborativer Roboter für individualisierte Lebensmittel in der Produktion von KMU“ Weiß, M. (Hochschule Hannover); Food Industry DLG Berlin
- 04/2022 AnugaFoodTec
- Digital twins require and support interdisciplinary process know-how using the example of the BMEL project DiKoRo; Weiß, M. (Hochschule Hannover); Smart Solutions – Higher Flexibility; DLG e.V. Session: The next level in automation
 - Neue Wege zur Ressourceneinsparung und Effizienzerhöhung: Beyer, K. (SimPlan AG); Smart Solutions – Higher Flexibility; DLG e.V. Session: The next level in automation
- 05/2022 Speed-Präsentation „Projekt DiKoRo“ Trusheim, M. (HS Hannover); Ahlemer Fachtagung Hannover
- 06/2022 Netzwerktreffen BMEL-Innovationsprojekte im Tagungswerk; Berlin Beyer, K. (SimPlan AG); Weiß, M. (Hochschule Hannover)
- 09/2022 Fachpack Messestand SimPlan AG; Beyer, K. (SimPlan AG); Weiß, M. (Hochschule Hannover)
- 10/2022 „Optimierung von Lebensmittelverpackungsanlagen mit Hilfe digitaler Zwillinge“; Beyer, K. (SimPlan AG); 14. Akademie Fresenius-Jahrestreffen "Produktionsleiter-Tagung"
- 10/2022 „Projekt DiKoRo“ Weiß, M. (Hochschule Hannover) Netzwerktreffen BLE Bonn
- 10/2023 Innovation Day am IQ Bremen
- „Optimierung mit Hilfe digitaler Zwillinge“; Beyer, K. (SimPlan AG)
 - „Leckere Produkte nachhaltig verpackt“ Weiß, M. (Hochschule Hannover)
- 12/2023 DLG-Forum FoodTec: DLG-Food Industry Digitale Transformation der Food Supply Chain – Richtungsweisende Trend; Moderation Weiß, M. (Hochschule Hannover)
- DiKoRo Film mit engl. Ton
- 03/2024 Anuga FoodTec
- DiKoRo Film mit englischen Untertiteln; Messestand DLG Frankfurt
 - Panel discussion: Digitalisation, robotics and automation auf Main stage; Weiß, M. (Hochschule Hannover)
 - Science Slam: Digitalisation, robotics and automation auf der Main stage; Beyer, K. (SimPlan AG)
 - Posterpräsentation (vgl. nachfolgende Seite); Messestand DLG Frankfurt
- 03/2024 „Digitale Zwillinge im Umfeld von Verarbeitungs- und Verpackungsanlagen in der Lebensmittelindustrie“ Gemeinschaftsvortrag Beyer, K. (SimPlan AG); Weiß, M. (Hochschule Hannover) auf dem Forum: "Automatisierung in der Nahrungs- und Genussmittelwirtschaft" Bremerhaven / NaGeB - Nahrungs- und Genussmittelwirtschaft Bremen e.V.



Abbildung 10-1: Projektposter DiKoRo Anuga FoodTec Köln 2024

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: DiKoRo - Schematische Übersicht	4
Abbildung 5-1: Kostenanteile	5
Abbildung 5-2: Versuchsstand 1 und Versuchsstand 2 in der Hochschule Hannover	7
Abbildung 5-3: Dosiersysteme Viscotec und Nassenheider	8
Abbildung 5-4 3D Drucker und 3D Fräse	8
Abbildung 5-5: Schnittstellen- und Hilfshardware Arduino UNO	9
Abbildung 6-1: Konventionell (manuell) erstellte Beispiele beider Produktbereiche	11
Abbildung 6-2: Schema Herstellung Lebkuchenherzen	12
Abbildung 6-3: Schema Dekorieren Lebkuchenherzen	12
Abbildung 6-4: Rohherzengrößen	12
Abbildung 6-5: 3D Druck von Dummys der Lebkuchenherzen	13
Abbildung 6-6: Definition der Herzsegmente und -parameter	13
Abbildung 6-7: Dickenmessung Prinzip und Ergebnisse für 63er und 67er	13
Abbildung 6-8: Flächenermittlung mit Kamera Prinzip und Ergebnisse	14
Abbildung 6-9: Berücksichtigung der Symmetrie Prinzip und Ergebnisse	14
Abbildung 6-10: Messung der Balligkeit	15
Abbildung 6-11: Vorbereitung: Traditionelle Arbeitsschritte	15
Abbildung 6-12: Traditionelle handwerkliche Dekoration	16
Abbildung 6-13: Rohstoffe, Spritztüten und -tüllen, sowie Trocknung	16
Abbildung 6-14: Marzipantorten Beispiele	17
Abbildung 6-15: Manuelle Formung der Tortenaufleger	17
Abbildung 6-16: Vorversuche am Versuchstand 1	18
Abbildung 6-17: Vergleich von Ersatzmedien	18
Abbildung 6-18: Ausgewählte Ergebnisse der Viskositätsmessung	20
Abbildung 6-19: Ausdehnung und erheblicher Nachlauf	20
Abbildung 6-20: Mindmap der Einflussgrößen	20
Abbildung 6-21: Rezepturabhängige Elastizität der Dosiermasse	21
Abbildung 6-22: Varianten der Zufuhrschläuche	21
Abbildung 6-23: Typische Fehler bei Schlauchauswahl und -einsatz	21
Abbildung 6-24: Ausschnitt Versuchsplanung Anhaftung und Streifenform	22
Abbildung 6-25: Trocknungsverhalten und Aushärtung	22
Abbildung 6-26: Bewegungsoptionen	23
Abbildung 6-27: Bewegungsbahn/Pfade erstellt in Adobe Illustrator/Inkscape – Übertragen auf iRC	24
Abbildung 6-28: Simulation der Bewegungsbahn am Versuchstand 2	24
Abbildung 6-29: Programme und Lösung für das Abstreifen am Dosierende	25
Abbildung 6-30: Erfolgreiche lineare Strangversuche	25
Abbildung 6-31: Lineare Strangversuche mit dem Versuchstand 2	25
Abbildung 6-32: Herzoginkartoffeln ungebacken/gebacken	26
Abbildung 6-33: 3D Druck Laugengebäck mit Programmausschnitt	26
Abbildung 6-34: Rezeptur Laugengebäck	27
Abbildung 6-35: Vergleich H-Muster ungebacken / gebacken	27
Abbildung 6-36: Mikrobiologische Grenzwerte ⁷	30
Abbildung 6-37: Mikrobiologische Testergebnisse Beispiel Teig	31
Abbildung 6-38: Ergebnisse Sensoriktest	31
Abbildung 6-39: Alternativen für Produktgruppe B	32
Abbildung 6-40: Varianten der Formung und Ausformung	32
Abbildung 6-41: Schema 3D Marzipantortenaufleger	33

Abbildung 6-42: 3D Druck von Tortenauflegern.....	33
Abbildung 6-43: Varianten 3D Druck Marzipan.....	34
Abbildung 6-44:Vergleich gefräste und gedruckte Form.....	34
Abbildung 6-45: Vergleich Tortenaufleger Marzipan und Fondant	35
Abbildung 6-46:Fräsen von Formen aus HDPE-Platten	35
Abbildung 6-47: Versuchsaufbau zum Extrudieren	36
Abbildung 6-48: Extrudierte Marzipankorpusse	36
Abbildung 6-49: Form mit Entlüftungsbohrungen für das Extrudieren	36
Abbildung 6-50: Beispiel Ausformungseffekte	37
Abbildung 6-51: Beispiele für das direkte Fräsen von Marzipanmasse.....	37
Abbildung 6-52: Kollaborative Arbeit mit Gamecontroller	38
Abbildung 6-53: MRK Kooperationstypen ⁹	38
Abbildung 6-54: Konzept Simulation in the Cloud und Schnittstellen Simulate3D	39
Abbildung 6-55: Framework Konzept für Digitale Zwillinge	40
Abbildung 6-56: Parallelkinematik mit Linux Steuerung an der HS-Hannover.....	40
Abbildung 6-57: Python als universelle Schnittstellensprache.....	41
Abbildung 6-58: Bilderkennung am Versuchstand 1	42
Abbildung 6-59: Beispiele Bilderkennung Position und Lage	42
Abbildung 6-60: Zeitgliederung nach DIN EN 415-11:2021-12 (Darstellung VDMA Frankfurt)	43
Abbildung 6-61: Beispielhafter Vergleich Parallel- und Reihenverkettung (PacSi SimPlan AG).....	44
Abbildung 6-62: Konzept der parallelen und sequentiellen Produktion ©SimPlan (Emulate3D).....	44
Abbildung 6-63: Beispiel Kostenvergleich der Robotersysteme [Projektmitarbeiter M. Trusheim].....	45
Abbildung 6-64: Beispiel Kalkulationen der Mindestverkaufsmenge pro Stück/Jahr	45
Abbildung 6-65: DiKoRo Gesamtschema Digitaler Zwilling	46
Abbildung 7-1: Übersicht über die Ergebnisse	47
Abbildung 10-1: Projektposter DiKoRo Anuga FoodTec Köln 2024	54