

*Schlussbericht*

**MQS15**

**Maschinen- und Qualitätssicherungskonzept für die Sandwichbearbeitung 2015**

*LUFOIV4-249-161 mit Förderkennzeichen:*

*20W1115C*

*Laufzeit des Vorhabens:*

01.01.2012 bis 31.03.2015

Hamburg, den 03.09.2015

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze  
(Projektleiter)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>KURZDARSTELLUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Aufgabenstellung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde</b> .....	<b>2</b>
<b>3 Planung und Ablauf des Vorhabens</b> .....	<b>3</b>
<b>4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde</b> .....	<b>4</b>
<b>4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden</b> .....	<b>4</b>
<b>4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste</b> .....	<b>6</b>
<b>5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen</b> .....	<b>7</b>
<b>EINGEHENDE DARSTELLUNG</b> .....	<b>8</b>
<b>6 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis</b> .....	<b>8</b>
<b>6.1 Vorgegebene Ziele</b> .....	<b>8</b>
<b>6.2 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen</b> .....	<b>9</b>
6.2.1 AP1 – Automatisierte Bauteilvermessung.....	9
6.2.1.1 AP1a – Aufgabenstellung und Analyse Bauteilverzug.....	9
6.2.1.2 AP1b – Automatisiertes Detektieren.....	14
6.2.1.2.1 AP1b1 - Verfahrensauswahl .....	14
6.2.1.2.2 AP1b2 - Prüfkonzept und Demonstrationsaufbau .....	21
6.2.1.3 AP1c – Korrektur NC-Umgebung .....	39
6.2.1.4 AP1d – Archivierung, Dokumentation und QS .....	39
6.2.2 AP2 – Maschine.....	40
6.2.2.1 Beratende Unterstützung.....	40
6.2.2.2 Trennschleifen oder Sägen als Verfahrensergänzung zum Fräsen.....	40
6.2.3 AP3 – Prozessentwicklung.....	45
6.2.3.1 AP3a – Prozessauslegung mech. Bearbeitung, Prozesssimulation .....	45
6.2.3.1.1 AP3a1 – Analyse.....	45
6.2.3.1.2 AP3a2 – Zerspanungsuntersuchungen an kritischen Materialkombinationen .....	47
6.2.3.1.3 AP3a5 – Prozess- und Werkzeugauslegung .....	48
6.2.3.1.4 AP3a6 – Sicherstellung Konzept unter Industriebedingungen .....	63

---

6.2.3.2	AP3b – Absaugung und Kühlung.....	63
6.2.3.2.1	AP3b1 – Grundlagenuntersuchung Kühlung .....	63
6.2.3.2.2	AP3b2 – Grundlagenuntersuchung Absaugung.....	64
6.2.3.2.3	AP3b3 – Konzepterstellung und Auslegung Kühlung und Absaugung.....	64
6.2.3.2.4	AP3b4 – Integration ins Maschinenkonzept .....	66
6.2.3.2.5	AP3b5 – Erprobung .....	66
6.2.3.3	AP3c – Kennzeichnung.....	67
6.2.3.3.1	AP3c1 – Prinzip Bauteilkennzeichnung.....	67
6.2.3.3.2	AP3c2 – Implementierung Kennzeichnung .....	67
6.2.3.4	AP3d – Prozessüberwachung.....	67
6.2.3.4.1	AP3d1 – Grundlagenuntersuchungen zur Prozessüberwachung.....	67
6.2.3.4.2	AP3d2 – Konzepterstellung Prozessüberwachung .....	68
6.2.3.4.3	AP3d3 – Entwicklung und Auslegung der Sensorik.....	72
6.2.3.4.4	AP3d4 – Erstellung Algorithmen .....	81
6.2.3.4.5	AP3d5 – Integration in das Maschinenkonzept.....	86
6.2.3.4.6	AP3d6 – Erprobung Überwachungskonzept.....	88
6.2.4	AP4 – Online QS.....	89
<b>6.3</b>	<b>Zusammenfassende Gegenüberstellung von Zielen und Ergebnissen .....</b>	<b>90</b>
<b>7</b>	<b>Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....</b>	<b>92</b>
<b>8</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....</b>	<b>94</b>
<b>10</b>	<b>Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....</b>	<b>95</b>
<b>11</b>	<b>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....</b>	<b>96</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>97</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Systematisierung von Verzugstypen.....	11
Abbildung 2: Einbindung der Bauteildetektion als separate Station in den Prozess.....	12
Abbildung 3: Definition der Messaufgabe Bauteildetektion.....	14
Abbildung 4: Bewertung von Verfahrenstypen zur zerstörungsfreien Qualitätssicherung nach (Zäh, Schlickerieder, & Mosandl, 2003).....	15
Abbildung 5: Eignung von Verfahren nach (Zäh, Schlickerieder, & Mosandl, 2003).....	17
Abbildung 6: Versuchsaufbau und -durchführung der Reflexionsimpulsthermographie ...	18
Abbildung 7: Vergleichende Übersicht der zu erreichenden Kontraste nach Material.....	19
Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Kontakttemperatur .....	20
Abbildung 9: Komponenten des Demonstrationsaufbaus zur Bauteildetektion .....	22
Abbildung 10: Modellierung des Kamera-Aktuator-Systems .....	23
Abbildung 11: Parameteridentifikation durch hierarchische Kalibration.....	25
Abbildung 12: Übersicht der drei Kalibrationsversuche .....	26
Abbildung 13: Versuchsaufbau Kalibration mit Kamerapositionen über der Messmarke..	26
Abbildung 14: Darstellung der Ergebnisse Kalibrationsversuch I.....	27
Abbildung 15: Visualisierung und Vergleich der Güten aus Kalibrationsversuchen .....	28
Abbildung 16: Kalibrationsversuch III – Wiederholgenauigkeit .....	29
Abbildung 17: Vollständige, subpixel-genaue Entzerrung mittels Kalibrationsdaten .....	29
Abbildung 18: Vergleich der Bildauswertung mit Schwellwertalgorithmus und PCA.....	30
Abbildung 19: Datenflusskonzept für die IR-Auswertung .....	31
Abbildung 20: Visualisierung des Informationsgehalts der Hauptkomponenten.....	32
Abbildung 21: Visualisierung des n-dimensionalen Klassifikationsansatzes .....	33
Abbildung 22: PCA-Algorithmus in der Anwendung auf Sandwichplatten.....	33
Abbildung 23: Problemstellung für Doppelbelichtungsversuche .....	35
Abbildung 24: Detektierbarkeit bei Doppelbelichtungsversuchen .....	36
Abbildung 25: Effekt der Doppelbelichtung in den PCA-Daten.....	36
Abbildung 26: Problemstellung Laminatüberlappung .....	37
Abbildung 27: Ergebnisse der Versuche zur Laminatüberlappung.....	37
Abbildung 28: Trennung der Konturen und Rückführung auf geometrische Primitiva.....	38
Abbildung 29: Geometrie des Eingriffs beim Trennschleifen der Decklage .....	41
Abbildung 30: Auswertung $y_{Nut}$ für $a_{p,min} = 0,4$ mm .....	42
Abbildung 31: Messung der Welligkeit von Sandwichbauteilen .....	43
Abbildung 32: Dickentoleranzen von gepressten Sandwichplatten .....	43
Abbildung 33: Bearbeitungsstrategien beim Taschenfräsen von GFK-Vollmaterial.....	47
Abbildung 34: Werkzeugschneidentemperaturen bei verschiedenen Bearbeitungsstrategien und -parametern.....	48
Abbildung 35: Einmessvorgang der Sandwichplatten .....	49
Abbildung 36: Koaxialität der Bohrung 1 und 2 von Ober und Unterseite je Bohrfeld.....	50
Abbildung 37: Werkzeugkonzepte zum beidseitigen Bearbeiten.....	51
Abbildung 38: Aufspannkonzent zum beidseitigen Bearbeiten.....	52
Abbildung 39: Verschleiß von Hartmetallfräsern mit Werkzeugdurchmesser 6 und 4 mm .....	53
Abbildung 40: Kolkentiefe über Vorschubweg bei verschieden beschichteten Fräswerkzeugen.....	54
Abbildung 41: Bearbeitungsqualität durch Trennschleifen .....	55

Abbildung 42: Verschleiß und Prozesskräfte des PKD-Sägeblatts über dem Vorschubweg .....	56
Abbildung 43: Verschleiß und Prozesskräfte des Fräswerkzeugs über dem Vorschubweg .....	56
Abbildung 44: Beispiel einer Sandwichplatte mit vielen Kleinbauteilen.....	58
Abbildung 45: Beispiel einer Sandwichplatte mit wenigen Großbauteilen .....	59
Abbildung 46: Bohrvorrichtungskonzepte für das manuelle Bohren von Sandwichmaterial .....	60
Abbildung 47: Bohrwerkzeuge für das manuelle Bohren von Sandwichmaterial .....	61
Abbildung 48: Einfluss der Bearbeitungsstrategie auf die Werkzeugschafttemperatur .....	62
Abbildung 49: Spanabfuhr beim Besäumen von Sandwichmaterial.....	64
Abbildung 50: Düsenanordnung und Versuchsaufbau zur Düsennachführung.....	65
Abbildung 51: Absaug-Blasdüsen-Konzept zur wirkstellennahen Erfassung von Spänen..	66
Abbildung 52: Möglichkeiten der Messung von Qualitätsmerkmalen während des Fertigungsprozesses.....	68
Abbildung 53: Schematische Darstellung der zu detektierenden Kantenmerkmale .....	69
Abbildung 54: Versuchsaufbau zur Detektion von Faserüberständen beim Fräsen.....	70
Abbildung 55: Einfluss der Fräsbedingungen auf die Faserüberstanderkennung.....	70
Abbildung 56: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Parametereinflusses auf die Werkzeugschafttemperatur .....	71
Abbildung 57: Werkzeugschafttemperatur über der Schnittgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Prozessparametern .....	72
Abbildung 58: Temperaturverlauf am geschwärtzten und ungeschwärtzten Werkzeug .....	73
Abbildung 59: Temperaturen an einem stirnseitig erhitzten Werkzeug .....	74
Abbildung 60: Detektionslogik für die Kantenüberwachung.....	75
Abbildung 61: Abschätzungen zur Sensorauslegung für den Einsatz zur Kantenüberwachung.....	76
Abbildung 62: Sensorkonfiguration zur Erfassung der Merkmale .....	77
Abbildung 63: Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Vorschubgrenzen auf GFK.....	78
Abbildung 64: Detektion von Faserüberständen an CFK.....	78
Abbildung 65: Höhen- und Winkelausgabe zur Detektion von Decklagenablösung.....	79
Abbildung 66: Erfassung der Kantengeometrie.....	80
Abbildung 67: Extrapolationsansatz für die Prozessüberwachung .....	81
Abbildung 68: Bestimmung der Ausgleichsgerade der Exponentialkoeffizienten.....	82
Abbildung 69: Ergebnis aus Simulation und Messung der Werkzeugschafttemperatur .....	83
Abbildung 70: Prinzip zur rechnerischen Ermittlung der Faserdichte.....	84
Abbildung 71: Faserdichte in Abhängigkeit vom Schwellwert für Wiederholungsmessungen .....	85
Abbildung 72: Prozessüberwachungskonzept zur Detektion von Faserüberständen .....	86
Abbildung 73: Gemittelten Faserüberstandsbreiten in Abhängigkeit von Belichtungszeit und Vorschubgeschwindigkeit.....	88
Abbildung 74: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	92

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Arbeitspakete- und Zeitplan .....	3
Tabelle 2: Prüfverfahren in der engeren Auswahl.....	17
Tabelle 3: Konfiguration des Ultraschallprüfaufbaus.....	20
Tabelle 4: Prozessmatrix für die Bohrungsqualität.....	61
Tabelle 5: Vergleich der Projektarbeitsziele mit den erreichten Status.....	91

## KURZDARSTELLUNG

### 1 Aufgabenstellung

Der gesteigerte Einsatz von Faserverbund-Werkstoffen im Transportsektor macht eine Optimierung der spanenden Fertigung der Faserverbund-Bauteile nötig. Im Rahmen des Projektes wurde die Aufgabenstellung eines Maschinen- und Qualitätssicherungskonzeptes auf dem Gebiet der Sandwichbearbeitung bearbeitet. Die wesentlichen Teilziele/Teilaufgaben, des Verbundprojektes *Maschinen- und Qualitätssicherungskonzept für die Sandwichbearbeitung 2015 (MQS15)*, können wie folgt formuliert werden:

- Einleiten eines Innovationssprungs bei der Erzeugung optimaler Bearbeitungsqualität
- Eine erhebliche Reduzierung der Bearbeitungs- und Durchlaufzeit von 50%,
- Eine Parallelisierung von Fertigungsschritten und höherer Automatisierungsgrad der Prozesskette

Das Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) übernahm im Verbundprojekt die Entwicklung von Lösungen und deren Umsetzung auf Laborebene.

Sandwichbauteile sind im vorliegenden Fertigungsablauf in große Sandwichplatten eingebettet. Nachdem die Sandwichplatten aus der Presse entformt wurden, werden sie der mechanischen Bearbeitung zugeführt. Im nächsten Schritt werden die Sandwichbauteile aus den Platten herausgetrennt. Im Ausgangsfertigungsablauf werden die Sandwichplatten manuell vom Bediener auf die Maschine referenziert. Das Teilziel zur Erhöhung des Automatisierungsgrades sieht eine automatische hauptzeitparallele Vermessung der Sandwichplatten hinsichtlich der Istgeometrie der darin geschachtelten Bauteile nach dem Entformen vor. Das IPMT hat dazu Lösungsmöglichkeiten formuliert, bewertet und das technisch sinnvolle Messprinzip durch Thermografie ausgearbeitet und auf Laborebene verifiziert. Auch der Prozessschritt des Kennzeichnens der Sandwichbauteile soll im neuen Maschinenkonzept automatisiert und hauptzeitparallel geschehen. Das Teilziel zum Einleiten eines Innovationssprungs bei der Erzeugung optimaler Bearbeitungsqualität wurde vom IPMT in der Weise bearbeitet, dass nach eingehender Recherche grundsätzlich neue Bearbeitungskonzepte, speziell das beidseitige HPC-Fräsen bei aufgeteilter Schnitttiefe, in Vorversuchen untersucht und ihre Tauglichkeit ermittelt wurde. Taugliche Konzepte wurden weiterentwickelt und in eingehenden Untersuchungen verifiziert. Zum Erreichen des Teilziels, der Reduzierung der Bearbeitungs- und Durchlaufzeit, wurde zum einen durch die Optimierung vorhandener Bearbeitungsprozesse hinsichtlich Kühlung und Absaugung und zum anderen durch die Entwicklung neuer bzw. Erprobung alternativer Bearbeitungsprozesse, z.B. HPC-Fräsen und Sägen, erreicht. Insbesondere die Ableitung von Anforderungen an das zu erstellende Maschinenkonzept standen im Fokus der Prozessentwicklung. Nach der spanenden Bearbeitung müssen im derzeitigen Fertigungsablauf Verbindungsstege zwischen Bauteilen innerhalb der Sandwichplatte getrennt werden. Diese Stege dienen der Fixierung der Sandwichbauteile während der spanenden Bearbeitung. Ziel des Verbundprojektes war auch diese Stege durch ein geeignetes Spannkonzent fallen zu lassen und so die Durchlaufzeit zu verringern. Auch die Entwicklung einer Online-Qualitätssicherung dient der Erhöhung des Automatisierungsgrades und der Parallelisierung von Prozessschritten.

## **2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Verbundprojekt MQS15 hat die Konzeption eines Maschinen- und Qualitätssicherungskonzeptes für die Sandwichbearbeitung zum Ziel. Durch innovative Technologien kann die Bearbeitungszeit verringert werden bei erhöhter Bauteilqualität. Die Anforderungen an dieses grundlegend neue Konzept ergeben sich aus dem derzeitigen Fertigungsablauf und den in Zukunft benötigten Produktionskapazitäten. Im Verbundprojekt wurden die Teilaspekte Automatische Bauteilvermessung, Prozessauslegung der mechanischen Bearbeitung, Absaugung und Kühlung des mechanischen Bearbeitungsprozesses, die Prozessüberwachung und Online-QS bearbeitet. Zusätzlich dazu unterstützte das IPMT bei den Themen Maschinenlayout und Bauteilkennzeichnung.

Das Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) der TU Hamburg-Harburg verfügt über weitreichendes Know-How im Bereich der Faserverbund-Bearbeitung, Kalibration von Produktionssystemen und Prozessmesstechnik. Die Faserverbundzerspannung unterscheidet sich grundlegend von der Zerspannung konventioneller Werkstoffe und hat andere Anforderungen an Verschleißverhalten, Temperaturfestigkeit der Werkzeuge, Peripherieprozesse und Prozessgestaltung. Auch auf dem Gebiet der Kalibration und Messtechnik konnte das IPMT sein Know-How entscheidend einbringen und den Teilaspekt der automatisierten Bauteilvermessung umsetzen.



### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens



Das Vorhaben war für das IPMT in die Arbeitspakete

1. AP1: Automatische Bauteilvermessung (Dauer: 2 Jahre, 1. Mitarbeiter (50%))
2. AP2: Maschine (Dauer: 1 ¾ Jahre, beratende Tätigkeit)
3. AP3: Prozessentwicklung (Dauer: 3 ¼ Jahre, 2. Mitarbeiter)
4. AP4: Online QS (Dauer: 1 ¾ Jahre, keine Förderung)

unterteilt. Die Basis für die einzelnen Arbeitspakete war der Arbeitspakete- und Zeitplan (Tabelle 1).

Tabelle 1: Arbeitspakete- und Zeitplan

AP#	AP-Bezeichnung	Quartal												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AP1	<b>Automatisierte Bauteilvermessung</b>													
AP1a	Aufgabenstellung und Analyse Bauteilverzug													
AP1b	Automatisiertes Detektieren													
AP1c	Korrektur NC-Umgebung													
AP1d	Archivierung, Dokumentation, QS													
AP2	<b>Maschine (Prototyp)</b>													
AP3	<b>Prozessentwicklung</b>													
AP3a	Prozessauslegung und -simulation													
AP3a1	Analyse													
AP3a2	Zerspanuntersuchungen an kritischen Materialkombination													
AP3a3	Materialanalysen zur Vorgabe von z.B. Temperaturgrenzen													
AP3a4	begleitende Simulationen, insbesondere hins. Therm. Schädigung													
AP3a5	Prozess- und Werkzeugauslegung													
AP3a6	Sicherstellung Konzept unter Industriebedingungen													
AP3b	Absaugung und Kühlung													
AP3b1	Grundlagenuntersuchungen Kühlung													
AP3b2	Grundlagenuntersuchungen Absaugung													
AP3b3	Konzepterstellung und Auslegung Kühlung und Absaugung													
AP3b4	Integration ins Maschinenkonzept													
AP3b5	Erprobung													
AP3c	Bauteilkennzeichnung													
AP3c1	Prinzip Kennzeichnung													
AP3c2	Implementierung Kennzeichnung													
AP3d	Prozessüberwachung													
AP3d1	Grundlagenuntersuchungen zur Prozessüberwachung													
AP3d2	Konzepterstellung Prozessüberwachung													
AP3d3	Entwicklung / Auslegung Sensorik													
AP3d4	Erstellung Algorithmen													
AP3d5	Integration in Maschinenkonzept													
AP3d6	Erprobung Überwachungskonzept													
AP4	<b>Online QS</b>													

 ungeförderetes AP  
 beratenden Tätigkeit IPMT

## 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

### 4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für die Durchführung des Vorhabens wurden keine Schutzrechte Dritter in Anspruch genommen. Zu Projektbeginn wurde die Patentlage im Rahmen einer Recherche aufgearbeitet und anschließend regelmäßig aktualisiert. Hinsichtlich der Verfahren für die automatische Detektion von Bauteilen innerhalb der Masterplatten (AP1) liefert die Recherche folgende Ergebnisse:

- Eine identische Problemstellung - der geometrischen Vermessung von Merkmalen innerhalb von intransparenten Sandwichbauteilen - ist in der Literatur bisher nicht beschrieben und wird als technische Lösung auf dem Markt nicht angeboten.
- Lösungsansätze für analoge oder ähnliche Fragestellungen bieten bspw. die Klebstellenprüfung in der Kunststofftechnik (Zäh, Schlicker, & Mosandl, 2003). Dabei beschränkt sich die Fragestellung auf die Anwesenheitskontrolle von Klebstoff; wichtig ist jedoch, dass dieses für optisch intransparente Materialien durchgeführt wird. Dabei werden zwei Verfahren als aussichtsreich dargestellt, in der Zukunft technisch ausgereifte Lösungen dazustellen:
  - Luftgekoppelter Ultraschall
  - Lockin-Thermographie
- Für das Verfahren des *Luftgekoppelten Ultraschalls* wird in der Veröffentlichung von Hillger (Hillger & Gebhardt, 1999) explizit erwähnt, dass Versuche an Sandwichbauteilen mit Papierwabe durchgeführt wurden. Einen Aufschluss über erreichbare Messgenauigkeiten geben weder die Veröffentlichung von Hillger noch die weiterführenden Untersuchungen Stößels (Stoessel, Krohn, Pfeiderer, & Busse, 2002) zur Anwendung des Luftgekoppelten Ultraschalls. Neuere Untersuchungen zur quantitativen Defektprüfung von Rotorblättern für Windräder aus GFK (Jüngert, 2010) sprechen von Auflösungen im Bereich von einigen Millimetern.
- Die Lockin-Thermographie und auch andere Formen der aktiven Thermographie sind zunehmend besser erforscht. Die qualitative Erfassung von Defekten speziell bei CFK gilt dabei als Stand der Technik (Fawaz & Armstrong, 2001) und wird bereits industriell angewandt. Die Weiterentwicklung zu einem Verfahren mit zuverlässiger Aussage über die geometrische Ausdehnung und die Tiefenlage im Material ist die derzeitige wissenschaftliche Herausforderung (Schmutzler, Liebig, Garcia, Knoll, & Schulte) (Zöcke, 2009).
  - Entscheidend für die in diesem Projekt geplante zusammenhängende Vermessung von großflächigen Strukturen ist die Kombination eines geeigneten 3-Achs-Portals mit entsprechend kalibrierter Infrarotaufnahmetechnik. Know-how für die Umrüstung von Werkzeugmaschinen und Industrierobotern ist am IMPT vorhanden (Wollnack, Wollnack 2001 – Videometrische Verfahren zur Genauigkeitssteigerung, 2001) und allgemein hinreichend erforscht (Godding, 2006). Dies gilt ebenfalls für die Kalibration von Kameras zur Videometrie im Allgemeinen (Wollnack, Wollnack 2005 – Dreidimensional messende videometrische Messsysteme

me), analoge Ansätze für die Kalibration von IR-Kameras sind in der Literatur ebenfalls veröffentlicht (Lagüela, González-Jorge, Armesto, & Arias, Lagüela, González-Jorge et al. 2011 – Calibration and verification of thermographic, 2011)(Luhmann, Luhmann 2010 – Geometric Calibration of Thermographic Cameras, 2010) und werden auf diese besondere Anwendung übertragen.

- Bezüglich der Signalverarbeitung und Verbesserung des Kontrasts bei der digitalen Bildverarbeitung sind ebenfalls innovative Ansätze zu finden, die für dieses Projekt weiterentwickelt werden (Rajic, Rajic 2002 – Principal component thermography for flaw, 2002).

Auf dem Gebiet der Honeycomb- bzw. Sandwich-Fertigung (AP3) ist die Forschungslandschaft übersichtlich. Eine Recherche zu aktuellen Schutzrechten, Forschungstätigkeiten und Entwicklungen ergab folgende Ergebnisse:

→ Mechanische Bearbeitung:

- Niemeyer (Niemeyer & Splithöfer, 2005) zeigt, dass zum Zuschneiden von Sandwichmaterialien das Kreissägeverfahren angewendet werden kann. Es existiert ein eigens entwickeltes Sägeblatt, das sich durch lärmarmen Betrieb, hohe Standzeit und hohe Schnittqualität auszeichnet.
- In (Hähnel, Wolf, Hauffe, Alekseev, & Zakirov, 2011) wird insbesondere der Kernaufbau der Sandwichstruktur betrachtet. Neben dem klassischen Honeycomb-Kernaufbau werden vor allem wedge-shaped folded cores (WSFC), also gefaltete Kernstrukturen, betrachtet und ihre Festigkeit nach einer mechanischen Bearbeitung.

→ Wasserstrahlschneiden:

- Reinwasserstrahlschneiden von Sandwich ist möglich
- Wasserstrahlschneiden kann für die Bearbeitung von Honeycombmaterial angewendet werden und wird zunehmend als Bearbeitungsverfahren in der Luftfahrtindustrie akzeptiert. (Jain, 2008)

→ Laserschneiden:

- Am Laser Zentrum Hannover wurde das Projekt „Grundlagenuntersuchungen zur Laser CFK Bearbeitung (CFK-Las)“ verfolgt mit einer Laufzeit bis 31.05.2013 gefördert vom Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur (Laserzentrum Hannover, 2012).
- Es wird vom LZH vermutet, dass „konventionelle Prozesse wie die mechanische Bearbeitung und das Wasserstrahlschneiden den Forderungen nach einer zunehmenden Automatisierung, Verschleißfreiheit sowie höheren Schnittgeschwindigkeiten nur bedingt nachkommen können.“ Es wird jedoch von Wandstärken der Bauteile von 3 mm gesprochen (Kunststoff Web, 2012).
- Das Institut für Holz- und Papiertechnik der TU Dresden betreibt intensive Forschung auf dem Gebiet der Sandwichfertigung für die Möbelindustrie (Institutes für Holz- und Papiertechnik, 2011). Es werden aber auch Leichtbaulösungen für den mobilen Einsatz entwickelt.

→ Generelles:

- Es gibt zwei verschiedene Fertigungsabläufe für Sandwichstrukturen:

- Spachteln des Wabenmaterials vor der mechanischen Bearbeitung.
  - Spachteln des Wabenmaterials nach der mechanischen Bearbeitung
- Da der generelle Fertigungsablauf sich bei Sandwichplatten unterscheidet, sind die sich ergebenden Probleme/Forschungsfelder sehr unterschiedlich. Wird vor der mechanischen Bearbeitung gespachtelt, ergeben sich wesentlich höhere Zerspannungstemperaturen aufgrund der schlechten Leitfähigkeit der Kernfüllmasse. Bei der Prozessvariante des Spachtelns nach der mechanischen Bearbeitung kommt es häufig zu Wabenüberständen über die Bauteilkante hinaus.

#### **4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Als Informationsquelle und während der Recherche des Standes der Technik wurden verschiedene Datenbanken sowie das weltweite Internet verwendet. Für die Patentrecherche wurde das Recherchesystem des Deutschen Patent- und Markenamtes verwendet (DEPATISnet). Es werden dort sowohl deutsche Gebrauchsmuster und Patente erfasst, als auch internationale Patentanmeldungen.

Hinsichtlich technischer Fragestellungen war das Web of Science von großer Hilfe. Für deutschsprachige Literatur bietet sich insbesondere die Datenbank der WTI Frankfurt eG (ehemals FIZ Technik) an. Aber auch verlagsbetriebene Datenbanken wie ScienceDirect oder Google Scholar (Suchmaschine von Google für wissenschaftliche Texte) wurden eingesetzt.

## **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Seitens des IPMT wurde nur mit den im Vorhaben beteiligten Partnern Elbe Flugzeugwerke GmbH (EFW) und Reichbacher Hamuel GmbH zusammengearbeitet.

## EINGEHENDE DARSTELLUNG

### 6 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis

#### 6.1 Vorgegebene Ziele

Im derzeitigen Fertigungsablauf werden die einzelnen Sandwichbauteile aus einer Sandwichplatte herausgetrennt. Dazu werden sie aus der Presse entformt und manuell auf der Bearbeitungsmaschine gerüstet und referenziert. Es kann beim Heraustrennen der Sandwichbauteile aus der Sandwichplatte Ausschuss, durch während des Pressvorgangs entstandenen Verzug, entstehen. Die manuelle Referenzierung der Sandwichplatten zur Maschine ist ungenau und Verzug der Sandwichplatten kann nur in Grenzen kompensiert werden. Allgemein ist der bisherige Fertigungsablauf charakterisiert durch einen hohen Anteil manueller Tätigkeiten. Zu diesen Schritten gehören u. a. die Kompensation des Bauteilverzugs durch Einmessen/Referenzieren der Sandwichplatten auf der Bearbeitungsmaschine und das Kennzeichnen der Sandwichbauteile innerhalb der Sandwichplatte nach dem manuellen Rüsten auf der Bearbeitungsmaschine.

Nach der mechanischen Bearbeitung werden die einzelnen Sandwichbauteile aus der Sandwichplatte entformt. Dazu werden Stege zwischen der Sandwichplatte und den Sandwichbauteilen manuell entfernt, die zur Bauteilfixierung stehen gelassen wurden. Da die Bearbeitungsbahnen in der Sandwichplatte in der Regel mit Spänen zugesetzt sind, müssen die Sandwichbauteile vor und nach dem Trennen der Stege gesäubert werden.

Die Kernziele des Verbundvorhabens waren deshalb:

1. Steigerung der Qualität
2. Verkürzung der Durchlaufzeit
3. Erhöhung des Automatisierungsgrades

Die vom IPMT bearbeiteten Arbeitspakete sind im Arbeitspakete- und Zeitplan dargestellt (Tabelle 1).

Im Arbeitspaket 1 wurde die automatische Bauteilvermessung konzipiert. Der Bearbeitungsprozess wurde in Arbeitspaket 3 untersucht. Im Arbeitspaket 2 war das IPMT nur beratend tätig und Arbeitspaket 4 unterlag keiner Förderung. Ergebnisse zu Arbeitspaket 2 sind in den Berichten der Projektpartner enthalten und über Ergebnisse des Arbeitspakets 4 wird nicht berichtet.

Das Vermessen der Sandwichplatten erfolgt zukünftig hauptzeitparallel auf einer separaten Vermessungsmaschine, um so den Bauteilverzug zu detektieren und die NC-Programme entsprechend zu korrigieren. Mittels Referenzpunkten kann die Bearbeitungsmaschine die Sandwichplatten referenzieren und das um den Bauteilverzug korrigierte Programm starten. Das Kennzeichnen wird hauptzeitparallel durch die Bearbeitungsmaschine geschehen. Die vereinzelt Platten können nun unmittelbar nach Ende der mechanischen Bearbeitung der Weiterverarbeitung zugeführt werden. Das manuelle Entgraten und Entfernen der Anbindungsstege kann aufgrund des neuen Spannkonzepes und eines automatischen Entgratschritts in der Maschine entfallen. Eine von Spänen befreite saubere Sandwichplatte wird durch ein Absaug-Blasdüsen-Konzept erreicht.

## 6.2 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen

### 6.2.1 AP1 – Automatisierte Bauteilvermessung

Ziel der automatisierten Bauteilvermessung ist die prozesssichere Erkennung der beim Pressen der Masterplatten auftretenden Verzüge vor dem Fräsen, um eine Kompensation zu ermöglichen oder weitere Wertschöpfung an Ausschussplatten zu verhindern. Das erste Unterarbeitspaket (*AP1a – Aufgabenstellung und Analyse Bauteilverzug*) diente zur genaueren Definition der Anforderungen an eine Vermessung und wurde aus einer Aufnahme der Ist-Situation im Fertigungsprozess abgeleitet. Bei der Sandwichplattenvermessung sollen wesentliche Merkmale der Ist-Geometrie der Masterplatten nach dem Pressen automatisiert erfasst werden (*AP1b – Automatisiertes Detektieren*). In einem zweiten Schritt werden diese mit der NC-Soll-Kontur des Fräsprogramms verglichen. Bei diesem Vergleich werden unzulässige Abweichungen identifiziert und durch geeignete Optimierungsalgorithmen sowohl für Einzelbauteile als auch für die gesamte Sandwichplatte kompensiert oder Einzelbauteile von einer weiteren Wertschöpfung durch die Fräsbearbeitung ausgeschlossen (*AP1c – Korrektur NC-Umgebung*). Langfristig sollen die so gewonnen Informationen über den Verzug strukturiert archiviert werden, um Rückschlüsse auf den Pressprozess und vorgelagerte Schritte und ggf. deren Optimierung zu ermöglichen (*AP1d – Archivierung, Dokumentation und QS*).

#### 6.2.1.1 AP1a – Aufgabenstellung und Analyse Bauteilverzug

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist es ein besseres Verständnis für den aktuellen Prozess des Einmessens der Bauteile und grundlegende Auswirkungen des Verzugs auf die Fräsbearbeitung zu erlangen, um eine möglichst exakte Aufgabenstellung für die Arbeitspakete 1b-d zu definieren.

##### Qualitative Ist-Aufnahme

Der Vorgang, der im Folgenden als „Einmessen“ beschrieben wird, hat im Prozess zwei Ziele. Zum einen die Referenzierung von Bauteilkoordinatensystem und Maschinenkoordinatensystem. Bedingt durch die Herstellungsweise der Masterplatten aus mehreren Schichten entsteht an den Kanten kein definierter Anschlag oder Referenz. Dieser Effekt muss beim Einmessen durch Verschiebung oder Rotation des Bauteils gegenüber dem Maschinenkoordinatensystem kompensiert werden. Zum anderen wird beim Einmessen des Bauteils festgestellt, ob der Verzug innerhalb des erwarteten Maßes liegt. Korrekturen werden ebenfalls durch Verschiebung oder Rotation der Koordinatensysteme vorgenommen.

Das Einmessen wird derzeit durch den für zwei Frästische zuständigen Maschinenbediener durchgeführt und findet direkt auf dem Tisch statt, welcher im Anschluss für die spanende Bearbeitung genutzt wird. Damit ist das Einmessen als Rüstvorgang zu klassifizieren, welcher Maschinenzeit in Anspruch nimmt. Die Einmesszeit wird durch die Bauteilkomplexität und den Umfang des Verzugs beeinflusst und nimmt mehrere Minuten in Anspruch. In seltenen Fällen ist eine manuelle Korrektur von Einzelbauteilen im NC-Menue notwendig, welche dann in einen vorgeschalteten Datenverarbeitungsprozess neu verschachtelt werden, wodurch sich die Einmesszeit zusätzlich verlängert.

Beim Einmessen positioniert der Bediener die Masterplatten mit Hilfe von Bohrungen, die beim Entformen eingebracht werden, auf dem Frästisch. Im Anschluss wird ein - durch die

NC-Programmierung vorgegebenes - Programm mit Senkbohrungen (Anpunktzyklus) ausgeführt. Dabei werden 6-8 Senkbohrungen, über das Bauteil verteilt, in die GFK-Stopfen eingebracht. Die Bohrungen werden – je nach Lage der Stopfen – nach Möglichkeit an den vier Ecken der 2000 x 3000 mm<sup>2</sup> großen Platten sowie mittig zwischen den Ecken positioniert. Der Bediener beurteilt im Anschluss die Außermittigkeit der Bohrungen im Vergleich zu den Stopfenmittelpunkten. Die Herausforderung dabei sind zum einen die großen Abmaße der Menues, so dass bei horizontaler Aufspannung nicht alle Bereiche gut einsehbar und bewertbar sind. Zum anderen sind die GFK-Stopfen bei den Sandwichplatten mit CFK-Decklage nur schemenhaft zu erahnen. Nach der Beurteilung aller Senkbohrungen kann der Maschinenbediener im Wesentlichen durch seinen Erfahrungsschatz beurteilen, ob das Gesamtbauteil zur Maschine korrigiert werden muss, sowie notwendige Korrekturen zum Ausgleich von Verzug bestimmen. Zum Ausgleich von Verzügen dreht oder verschiebt der Bediener das Bauteilkoordinatensystem, so dass im Rahmen der zulässigen Toleranzen alle Bauteile gefertigt werden können. Aus der Eingabe der Korrektur in die Maschine (Verschiebung in X- oder Y-Richtung oder Rotationen um den Koordinatenursprung) ist der ursächliche Effekt nicht mehr zu erkennen. Dies ist ein weiteres Argument gegen eine sehr umfangreiche Ist-Aufnahme der Verzüge, denn aus Korrekturdaten alleine ist kein eindeutiger Rückschluss auf Verzüge zu treffen.

In der Regel erfordert eine erste Korrektur eine Überprüfung durch erneutes Abfahren des Programms von Senkbohrungen. Dies dient u.a. dazu Vorzeichenfehlern und unzureichenden oder übermäßigen Korrekturen vorzubeugen. Wird diese festgestellt, so wird nach der erneuten Korrektur nochmal ein Anpunktzyklus gefahren, welcher unter einer Minute dauert. Auf diese Weise summierte sich das gesamte Einmessen zeitlich aus Anpunktzyklus, Beurteilung und Korrektur abhängig von der Anzahl der Iterationen auf die o.g. Zeiten, die zu Lasten der wertschöpfend genutzten Maschinenzeit fallen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der beschriebene Prozess ein nur teilweise automatisierter Schritt ist, bei dem an vielen Stellen auf die Erfahrung des Bedieners zurückgegriffen wird. Daher kommt es zum einen dazu, dass Fehler in der Korrektur durch den Bediener entstehen, die erst nach vollständiger Ausführung des Fräsprogramms auffallen und meist zu Ausschuss der betroffenen Platten führen. Zum anderen ist nicht immer gewährleistet, dass durch die geringe Anzahl von Anpunktstellen im Vergleich zu der Anzahl der Bauteile innerhalb der Masterplatte stets die vollständige Optimierung möglich ist. Zudem stößt die menschliche Vorstellungskraft bei dieser mehrstufigen Optimierung von meist fünf teilweise bis zu 30 Einzelbauteilen an ihre Grenzen, so dass nicht immer eine optimale Korrektur gewährleistet ist und vermeidbarer Ausschuss beim Fräsen entsteht.

Zudem ist mit der heute angewandten Methode ein grundsätzliches Problem des Prozesses nicht zu lösen. Zum Anpunkten und zur anschließenden Beurteilung sind nur GFK-Stopfen als Merkmale geeignet. Daher tritt die Schwierigkeit auf, dass die großvolumige Serie der Frachtraumplatten nicht eingemessen wird, weil in dieser keine Stopfen verbaut werden. Grundsätzlich wäre aber eine Merkmalerfassung sehr einfach möglich, da die Materialien eine vollständig transparente Decklage aufweisen. Diese ist wiederum bei den CFK dominierten Materialien weitgehend intransparent, so dass die enthaltenen GFK-Stopfen nur schemenhaft auszumachen sind. Eine zukünftige Detektionslösung bietet daher neben einem verbesserten physikalischen Messprinzip die Vorzüge der Automatisierung und der Nachvollziehbarkeit von Verzügen auf statistischer Basis.



### Systematisierung des Verzugs

Im Rahmen der Ist-Aufnahme, durch gezielte Bediener-Interviews und Diskussionen im Rahmen von Projekt- und Arbeitstreffen, ist eine grundlegende Typisierung und damit Systematisierung entwickelt worden. Abbildung 1 zeigt die entwickelten Verzugstypen. Im ersten Schritt wird dabei zwischen Verzug in der Masterplatte und Verzug des einzelnen Bauteils unterschieden.

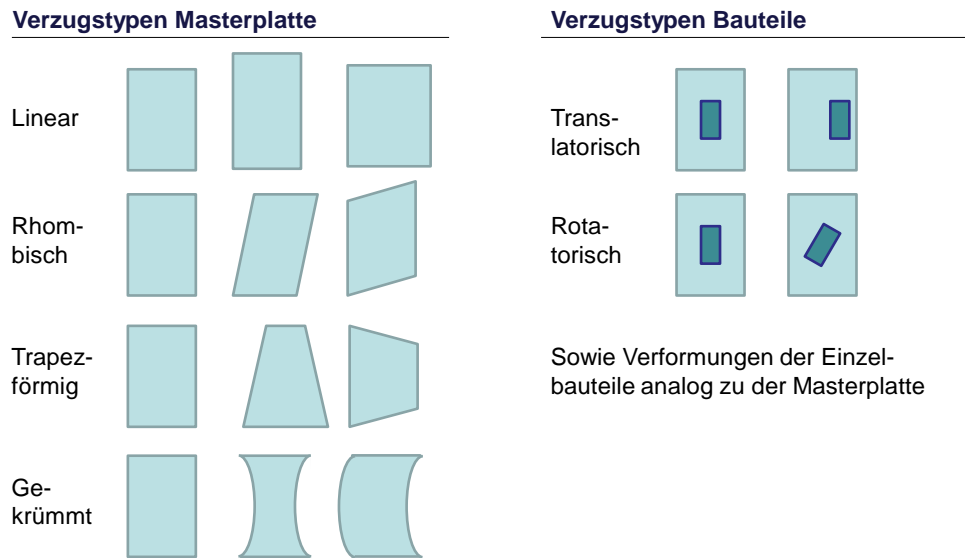


Abbildung 1: Systematisierung von Verzugstypen

Beim Verzug der Masterplatte wird idealisiert von einem gleichmäßigen Verzug über die gesamte Platte hinweg ausgegangen. Die identifizierten Verzugstypen linear, rhombisch, trapezförmig und gekrümmt sind auf der linken Hälfte der Abbildung 1 schematisch in ihren Ausprägungen dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die in der rechten Hälfte dargestellten Einzelbauteile ebenfalls entsprechend dieser vier Verzugstypen verhalten, sich jedoch zusätzlich translatorisch und rotatorisch innerhalb der Masterplatte verschieben.

Weiterhin ist anzunehmen, dass sich die beschriebenen Verzugstypen überlagern und zusätzlich unsystematische, nicht erfassbare Einzelverzüge auftreten. Daher ist eine großflächige Erfassung von Merkmalen der Platten-Ist-Geometrie notwendig, um Verzugstypen automatisiert auswerten zu können. Wie eingangs in der Ist-Aufnahme beschrieben, werden derzeit nur 6-8 Senkbohrungen eingebracht. Das theoretische Minimum für die Detektion der Verzugstypen zumindest auf Menueebene liegt bei 9 gleichmäßig über die Platte verteilten Senkungen. Rein mechanisch ist der zusätzlich notwendige Senkpunkt in der Mitte der Platte aufgrund der geometrischen Dimensionen nicht auswertbar. Eine detaillierte Anwendung der Typisierung und statistischen Auswertung mit Rückschluss auf vorangehende Prozessschritte wird daher erst nach Fertigstellung eines Demonstrationsaufbaus oder Prototypen der Messstation möglich sein.

### Einbindung in das Prozesslayout

Im Anschluss an die qualitative Ist-Aufnahme durch mehrere Besuche in der Produktion der Elbe Flugzeugwerke in Dresden steht die Diskussion der Einbindung der Messstation

in das Gesamtprozesslayout. Die Überlegungen entstehen in enger Abstimmung mit dem Arbeitspaket 2 zum Prozess- und Maschinenlayout. Primäres Ergebnis der Überlegungen zu Integrationsmöglichkeiten des Messschritts in den Gesamtprozess ist die Entscheidung, diesen als separate Station einzubinden. Abbildung 2 zeigt die Einbindung des Messschritts als separate Station und stellt die Festlegungen für die Einbindung dar.

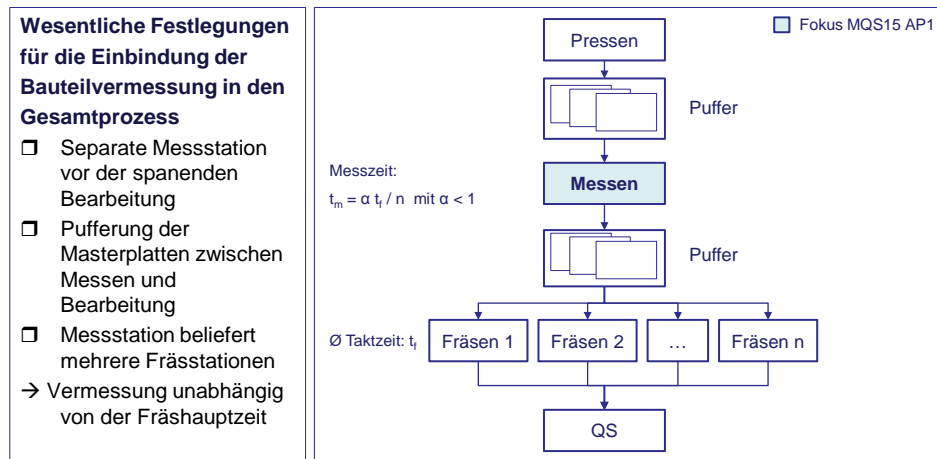


Abbildung 2: Einbindung der Bauteildetektion als separate Station in den Prozess

Die Entscheidung über die Einbindung des Messschritts wurde unter der Prämisse einer hauptzeitunabhängigen (Fräsen) Vermessung gefällt. Daher wird die Messstation im zukünftigen Maschinenkonzept von der eigentlichen spanenden Bearbeitung räumlich getrennt. Der Vorteil liegt darin, dass nicht jedes Fräsbearbeitungszentrum mit einer Messeinheit ausgestattet werden muss. Das dadurch entstehende Problem des Referenzierens zwischen der Mess- und der Frässtation wird als lösbar eingeschätzt.

Bereits heute werden die Masterplatten nach dem Pressen vor den derzeit 6 Frästmischen gepuffert und flexibel nach Auftragschachtelung und Fräsmaschinenbelegung entnommen. Durch die Einführung einer separaten Messstation wird ein weiterer Zwischenpuffer notwendig, über welchen die Fräsmaschinen dann bedient werden.

Eine der Anforderungen an das Messsystem ist die zulässige Zykluszeit. Eine Abschätzung kann über zwei Ansätze erfolgen. Eine der möglichen Abschätzungen der maximal verfügbaren Messzeit basierend auf der Fräszykluszeit berechnet sich wie folgt:

$$t_{m(a)} = \alpha \cdot t_f \cdot \frac{n_m}{n_f} \quad \text{mit } \alpha \leq 1$$

Dabei ist  $t_f$  die durchschnittliche Fräszykluszeit,  $n_f$  die Anzahl der belieferten Frästmische und  $n_m$  die Anzahl der Messstationen. Der Sicherheitsfaktor  $\alpha$  muss mit einem Wert kleiner eins berücksichtigt werden, um die Prozesssicherheit zu gewährleisten.

Eine alternative Abschätzung ist über die tägliche Ausbringungsmenge mit folgender Formel möglich:

$$t_{m(b)} = \alpha \cdot \frac{t_s}{n_{\text{menues}}} \quad \text{mit } \alpha \leq 1$$

Dabei ist  $t_s$  die tägliche Schichtzeit und  $n_{\text{menues}}$  die Zahl der gefrästen Menues.

Die Auswertung der Formelalternativen (a) und (b) mit  $\alpha = 1$  ergibt die maximal verfügbare Messzeit in der aktuellen Maschinenkonfiguration und ausgehend von einer Messstation. Basierend auf EFW-Produktionsdaten liegt damit die geschätzte Messzeit bei  $\sim 350$  Sekunden. Durch Hinzufügen einer weiteren Messstation verdoppelt sich die verfügbare Zeit bedingt durch den linearen Zusammenhang. Damit definiert sich bereits eine der Zielgrößen mit deren Hilfe sich verschiedene Verfahren für die Messung auswählen und vergleichen lassen.

Wichtigster Punkt, welcher zu diesem Zeitpunkt an der Schnittstelle zum Arbeitspaket 2 „Maschine“ ungeklärt bleibt, ist die Art der Aufspannung und damit Referenzierung zwischen Bauteil und Maschine. Die Klärung dieses Aspekts ist jedoch weitgehend unabhängig von der grundlegenden Verfahrensauswahl und den Grundlagenversuchen zur Vermessung.

### Definition der Messaufgabe

Im Mittelpunkt dieses Teilarbeitspakets steht die Definition der Messaufgabe für das Arbeitspaket „Automatisierte Bauteilvermessung“. Dabei wird auf die in der Ist-Aufnahme gewonnen Erkenntnisse sowie Anforderungen seitens der Elbe Flugzeugwerke zurückgegriffen.

In der Summe soll die automatisierte Bauteilvermessung den heutigen, manuellen und fehleranfälligen Einmessschritt ersetzen und eine langfristige statistische Überwachung des Bauteilverzugs beim Pressen ermöglichen. Dazu muss ein Vergleich der vorliegenden Ist-Geometrie nach dem Pressen mit der Soll-Geometrie nach Schachtelplan und dem daraus abgeleiteten NC-Programm für die Fräsbearbeitung erfolgen.

Abbildung 3 visualisiert die Aufgabe für die zu entwickelnde Messstation. Zusammenfassend kann die Messaufgabe als die Lagebestimmung von Schwerpunkten geometrisch bekannter Objekte beschrieben werden. Als Input zur Messung dient zum einen – wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt – eine noch zu definierende Referenz für ein Messkoordinatensystem, welches von der Wahl der Aufspannung abhängt. Weiterhin sind die Geometrie und die Soll-Lage der zu detektierenden Formelemente bekannt. Als Formelemente werden Spachtelbahnen (mit definierter Breite), GFK-Stopfen (mit bekanntem Durchmesser) und Einlegeteile aus GFK (mit definierten Abmessungen/Schwerpunkt) bezeichnet.

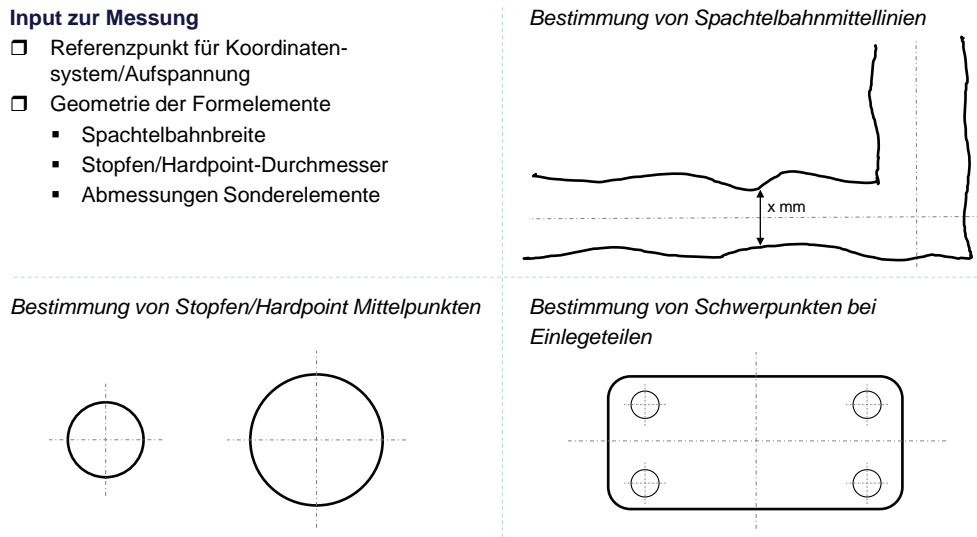


Abbildung 3: Definition der Messaufgabe Bauteildetektion

Die eigentliche Aufgabe bei der Detektion ist die Erfassung der bekannten Geometrien und die Bestimmung der Lage des z.B. Mittelpunkts innerhalb des Bauteilkoordinatensystems, um diese mit der Soll-Lage abzugleichen.

### 6.2.1.2 AP1b – Automatisiertes Detektieren

Das Arbeitspaket 1b zu „Automatisiertes Detektieren“ ist im Detailarbeitsplan zweistufig angelegt. In einem ersten Schritt sollen Grundlagenüberlegungen und -untersuchungen durchgeführt werden.

- **Verfahrensauswahl** und Grundlagenversuche
- Konzept und aktueller Status des **Demonstrationsaufbaus**
  - Infrarot Aufnahme
  - Infrarot Auswertung
  - Konturauswertung

Der Bericht zu diesem Arbeitspaket gliedert sich in die Abschnitte gemäß **Verfahrensauswahl** und **Demonstrationsaufbau**

#### 6.2.1.2.1 AP1b1 - Verfahrensauswahl

Im Abschnitt zur Verfahrensauswahl wird ein kurzer Stand der Technik über verfügbare Verfahrenstypen zur zerstörungsfreien Prüfung gegeben, um anschließend einzelne Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung für das gegebene Vermessungsproblem zu bewerten. Aus der Bewertung haben sich aus heutiger Sicht Ultraschall und Thermographie als grundsätzlich geeignet herausgestellt. Zur weiteren Machbarkeitsprüfung werden zur Ultraschallprüfung Vergleichsversuche durch ein Ingenieurbüro durchgeführt. Wesentlich umfangreichere Versuche sind bereits zu Thermographie im IPMT durchgeführt worden.

#### Verfahrensauswahl

Bei der Verfahrensauswahl wird versucht auf bestehende wissenschaftliche Bewertungen von Verfahren zurückzugreifen. Da das Problem der Vermessung von Sandwichbauteilen in der Literatur bisher nicht erwähnt ist, muss auf Problemstellungen mit analogen Merk-

malen zurückgegriffen werden. Zäh et al. (Zäh, Schlickerrieder, & Mosandl, 2003) veröffentlichten im Jahr 2003 eine Bewertung von NDT-Verfahren in Hinblick auf ihre Eignung für die Klebtechnik. Die Klebtechnik steht bei der automatisierten zerstörungsfreien Prüfung von Fügestellen vor einer ähnlichen Herausforderung, wie dieses Arbeitspaket. Bei der Prüfung von Klebstellen in der Kunststofftechnik geht es darum zu testen, ob zwischen zwei Lagen Kunststoff ausreichend und korrekt Klebstoff aufgetragen wurde. Die Prüfaufgabe ist daher sehr analog zur Detektion der Lage von bspw. GFK-Stopfen unter einer intransparenten CFK-Decklage mit variabler Dicke.

ZÄH klassifiziert die diversen Verfahren zur NDT-Prüfung in sechs verschiedene Typen. Abbildung 4 zeigt einen Überblick der sechs Verfahrenstypen und bewertet diese bezüglich ihrer grundsätzlichen Eignung für die automatisierte Bauteilvermessung.

Verfahrenstyp	Bewertung
<input type="checkbox"/> Visuell	<input type="checkbox"/> <b>Grundsätzlich geeignet</b> – Verfahrensgrenze durch Intransparenz der Decklage
<input type="checkbox"/> Durchdringende Strahlung	<input type="checkbox"/> <b>Sehr gut geeignet</b> – Durchstrahlung von intransparenten Bauteilen <input type="checkbox"/> <b>Arbeitsschutz</b> bei hoch-energetische Strahlung - z.B. Röntgen – limitieren die industrielle Anwendung
<input type="checkbox"/> Thermisch	<input type="checkbox"/> <b>Sehr gut geeignet</b> für intransparente Bauteile <input type="checkbox"/> Mögliche <b>thermische Schädigung</b> durch Erwärmung im Verfahren zu beachten
<input type="checkbox"/> Mechanische Vibration	<input type="checkbox"/> <b>Denkbar</b> – Stark eingeschränkt durch Zulassung des Verfahrens für die Serienproduktion in der Luftfahrt
<input type="checkbox"/> Magnetisch-elektrisch	<input type="checkbox"/> <b>Eingeschränkt einsetzbar</b> – Kunststoffe wirken elektromagnetisch transparent bzw. isolierend
<input type="checkbox"/> Chemisch-elektrochemisch	<input type="checkbox"/> <b>Nicht anwendbar</b> – Verfahren für die Rissprüfung

Abbildung 4: Bewertung von Verfahrenstypen zur zerstörungsfreien Qualitätssicherung nach (Zäh, Schlickerrieder, & Mosandl, 2003)

*Visuelle Verfahren* sind für die Prüfaufgabe grundsätzlich sehr gut geeignet, da sie in Verbindung mit digitaler Bildverarbeitung schnelle und ausreichend genaue Bilder liefern. Die Einschränkung dabei ist, dass viele der Materialien intransparent sind oder keinen ausreichenden Kontrast liefern. Daher können Visuelle Verfahren ausschließlich ergänzend zu einem anderen Verfahren verwendet werden, falls dies eine zu hohe Prüfzeit ausweist und der Durchschnitt dann über die schnelle visuelle Prüfung gedrückt werden kann. Wie in Abbildung 5 gezeigt, wurden CCD-Kamera und Shearographie tiefergehend recherchiert. Shearographie ist jedoch heute noch ein sehr komplexes Verfahren, das sich im Entwicklungsstadium befindet und sich durch extrem hohe Verfahrenskosten in der industriellen Anwendung auszeichnet.

*Durchdringende Strahlung* ist selbstverständlich sehr gut geeignet, da durch eine zweckmäßige Wellenlängenwahl die Bauteile mit intransparenten Decklagen geprüft werden können. Eine primäre Einschränkung ist der Aspekt der Auflagen durch den Arbeitsschutz. Dieser stellt strenge Anforderungen an die Abschirmung der teilweise hochenergetischen Strahlung. Eine Abschirmung ganzer Bauteilmenues ist aufgrund der geometrischen Abmessungen sehr herausfordernd, daher kommen Verfahren mit durchdringender Strah-

lung vorerst nicht in die engere Wahl, zumal zu berücksichtigen ist, dass die zu detektierenden Merkmale wenige Zehntelmillimeter unter den Decklagen zu finden sind. Wie in Abbildung 5 gezeigt, sind auch im Detail viele der Verfahren auszuschließen. So beschränkt sich bspw. die Tomographie auf die 3D-Vermessung von inneren Strukturen, wozu das Bauteil mindestens 2D innerhalb der Prüfanlage gedreht werden muss. Einzig die Durchstrahlung könnte – unter Berücksichtigung von Arbeitsschutzrichtlinien – eine Möglichkeit für ein alternatives Prüfverfahren bieten. Der zu wählenden Strahlungstyp und –stärke müssten dabei genauer definiert werden.

*Thermische Verfahren* sind teilweise sehr geeignet für die Erzeugung eines Kontrasts bei den intransparenten Decklagen. Einzig ist dabei zu beachten, dass im Verbundwerkstoff Sandwich viele verschiedene Materialien verwendet werden und jeweils Grenzen für thermischen Schädigung eingehalten werden müssen.

Abbildung 5 oben zeigt, dass speziell Impuls-Video-Thermographie als auch Reflexionsimpuls-Thermographie für eine Detektion von Merkmalen in den Sandwichplatten in Frage kommen. Dabei wird der Effekt der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der in den Platten verwendeten Materialien genutzt. Weiterhin kann die Lockin-Thermographie als mögliches Verfahren genannt werden. Derzeit wird diese zur Detektion von inneren Fehlstellen bereits in einer Vielzahl von Forschungsprojekten im Bereich von Faserverbundwerkstoffen genutzt (Fawaz & Armstrong, 2001; Siemer, 2010; Zöcke, 2009). Grenze des Verfahrens ist der Zeitaufwand. Weiteren Verfahren, die z.B. auf die Erwärmung durch mechanische Vibration beruhen und mehrheitlich aus der Materialeigenschaftsprüfung stammen sind aufgrund der langen Verfahrenszeit und komplexen Bildgebung auszuschließen.

Verfahren mit Bildgebung mittels *Mechanischer Vibration* sind grundsätzlich in ihrer Eignung eingeschränkt, da es zu Schwierigkeiten bei der Zulassung im Bereich Luftfahrt kommen kann. Dabei ist speziell bei komplexen Verbundwerkstoffen wie Sandwich der Nachweis sinnvoll, dass durch die eingebrachte Energie keine Fortpflanzung von Rissen an bestehenden Fehlstellen induziert wird (Li, Holland, & Meeker, 2010; Chen, 2007). Abbildung 5 unten zeigt die Verfahren innerhalb des Typs der Mechanischen Vibration. Lediglich das Verfahren des Luftgekoppelten Ultraschalls erscheint aus Sicht der Prozessanforderungen und den Rahmenbedingungen der Luftfahrt erfolgsversprechend. Zur Prüfung von Sandwichbauteilen liegen aus dem Jahr 1999 Forschungsergebnisse auf Laborebene vor, die sich mit den physikalischen Grenzen der Luftankopplung bei Faserverbund befassen (Hillger & Gebhardt, 1999).

		● Geeignet		◐ Eingeschränkt geeignet		◑ Ungeeignet	
<b>Visuell</b>		<b>Durchdringende Strahlung</b>		<b>Thermisch</b>			
<input type="checkbox"/> CCD-Kamera	◐	<input type="checkbox"/> Durchstrahlung	●	<input type="checkbox"/> Impuls-Video-Thermographie	●		
<input type="checkbox"/> Lichtschnitt	◑	<input type="checkbox"/> Laminographie	◑	<input type="checkbox"/> Reflexionsimpuls-Thermographie	●		
<input type="checkbox"/> Speckle-Interferometrie	◑	<input type="checkbox"/> Tomographie	◑	<input type="checkbox"/> Induktions-Thermographie	◑		
<input type="checkbox"/> FTIR	◑	<input type="checkbox"/> Mikrowellen	◑	<input type="checkbox"/> Lockin-Thermographie	◐		
<input type="checkbox"/> Shearographie	●	<input type="checkbox"/> Eindringen durch Radionukliden	◑	<input type="checkbox"/> US-Burst-Phasen-Thermographie	◑		
<input type="checkbox"/> Holographie	◑			<input type="checkbox"/> Bildgebende Vibrometrie	◑		
<input type="checkbox"/> Moiré-Verfahren	◑			<input type="checkbox"/> Spannungsanalyse	◑		
<input type="checkbox"/> Laser Scanning Mikroskopie	◑						
<b>Mechanische Vibration</b>		<b>Magnetisch-elektrisch</b>		<b>Chemisch-elektrochemisch</b>			
<input type="checkbox"/> Vibrometrie	◑	<input type="checkbox"/> Wirbelstrom	◑	<input type="checkbox"/> Eindringverfahren	◑		
<input type="checkbox"/> Impulsecho	◑	<input type="checkbox"/> Wechselstrom	◑				
<input type="checkbox"/> Doppeldurchstrahlung	◑						
<input type="checkbox"/> Luftgekoppelter Ultraschall	◐						
<input type="checkbox"/> Nichtlinearer Ultraschall	◑						
<input type="checkbox"/> Laser Ultraschall	◑						
<input type="checkbox"/> Schallemissionsanalyse	◑						

Abbildung 5: Eignung von Verfahren nach (Zäh, Schlickerieder, &amp; Mosandl, 2003)

*Magnetisch-elektrische Verfahren* sind grundsätzlich auszuschließen, da sich die verwendeten Kunststoffe elektromagnetisch intransparent bzw. isolierend verhalten.

Bei den *Chemisch-elektrochemischen Typen* handelt es sich um Sonderverfahren, die für die Rissprüfung entwickelt wurden und sind hier ebenfalls nicht weiterzuverfolgen.

Zäh resümiert im Jahr 2003 für die Nahtprüfung in der Kunststoffklebtechnik, dass sich "Erfolg versprechende Methoden, wie beispielsweise der luftgekoppelte Ultraschall oder die Lockin-Thermographie, [...] noch im Forschungsstadium [...]" befinden (Zäh, Schlickerieder, & Mosandl, 2003, S. 30). Aktuelle Recherchen bei Anbietern und auf Messen haben ergeben, dass zumindest Shearographie sich als zusätzliches Verfahren in Richtung einer – zwar noch teuren – industriellen Prüftechnik entwickelt hat.

Tabelle 2: Prüfverfahren in der engeren Auswahl

- ➔ Thermographie                      Aussichtsreichstes Verfahren
- ➔ CCD-Kamera                        Optional kombinierbar mit Thermographie
- ➔ Shearographie                      Alternatives Verfahren – derzeit kostspielig
- ➔ Luftgekoppelter Ultraschall      Physikalische Grenze der Impedanz zu prüfen

Tabelle 2 fasst die Ergebnisse dieses Abschnitts in Hinblick auf die möglichen Prüfverfahren näher zusammen. Thermographie ist dabei hinsichtlich physikalischer Wirkungsweise

und Kombinierbarkeit mit digitaler Bilderverarbeitung das aussichtsreichste Verfahren. Zusätzlich könnte dies mit einer CCD-Kamera kombiniert werden. Shearographie wird in einem ersten Schritt nicht weiterverfolgt, bedingt durch hohe Anlagenkosten. Ultraschall mittels Luftankopplung ist bezüglich der physikalischen Grenze der Impedanz zwischen Luft und Decklage zu prüfen, um festzustellen, ob erforderliche Auflösungen erreicht werden.

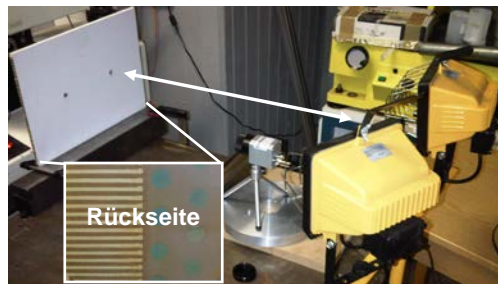
### Grundlagenversuche Thermographie

Aus der Literatur ist hinreichend bekannt, dass sich die unterschiedlichen Verfahrensvarianten der Thermographie (vgl. Abbildung 5) dazu eignen Fehlstellen in Faserverbundmaterialien qualitativ zu detektieren (Fawaz & Armstrong, 2001; Siemer, 2010; Zöcke, 2009). Dabei wird der Effekt genutzt, dass eine Fehlstelle (Lufteinschluss) eine andere thermische Eigenschaft besitzt als das umgebende Material.

Eben selbiger Effekt soll auch bei der Detektion von GFK-Hardpoints, Spachtelbahnen und GFK-Einlegeteilen genutzt werden. Bestrahlt man eine Sandwichplatte mit Licht, so wird ein Teil des Lichts reflektiert, ein weiterer als Wärme absorbiert und ein dritter Teil - umgewandelt in Wärme - durchgeleitet. Die erläuterten Effekte folgen Naturgesetzmäßigkeiten, welche durch Wärmeleitfähigkeits- und Wärmekapazitätskonstanten beschrieben werden. Da es sich um materialabhängige Konstanten handelt, wird angenommen, dass sich die verwendeten Sandwichbestandteile in der thermographischen Untersuchung unterschiedlich verhalten.

#### Versuchsaufbau

- Leistung Halogenstrahler:  
2 x 400W
- Abstand Strahler zur Platte:  
0,4 - 0,9 m
- Infrarotkamera Optris PI400
  - Optische Auflösung:  
382 x 288 Pixel
  - Empfindlichkeit von 80 mK



#### Versuchsdurchführung

- Aufnahme der Aufwärm- und Abkühlphase

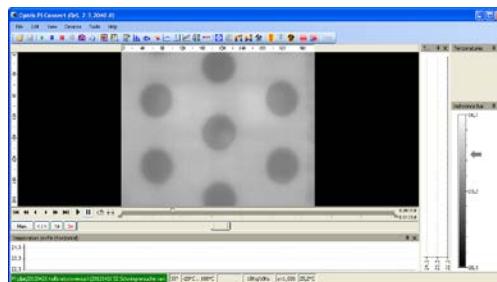
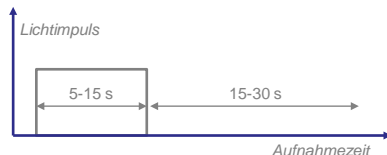


Abbildung 6: Versuchsaufbau und -durchführung der Reflexionsimpuls-thermographie

Am IMPT wird der in Abbildung 6 dargestellte Versuchsaufbau zur Reflexionsimpuls-thermographie genutzt. Dabei werden zwei Halogenstrahler in ihrer Eigenschaft als Licht- und Wärmequelle genutzt und in variierbarem Abstand zum Messobjekt platziert. Die zur Aufnahme verwendete Infrarotkamera Optris PI400 mit optischer Auflösung von 382 x 288 Bildpunkten und einer thermischen Empfindlichkeit von 80 mK wird auf derselben Seite in gewünschtem Abstand positioniert. Dieser hängt vom benötigten Bildausschnitt ab und beeinflusst die Auflösung im aufgenommenen Bild.



Während des Versuchs wird der Temperaturverlauf der Oberfläche der Sandwichplatten mit der Infrarotkamera aufgezeichnet und mit der mitgelieferten Software in ein Falschfarbenvideo umgewandelt. Dabei entspricht beim in Abbildung 6 gezeigten Standbild jeder Grauwert einer auf der Skala angezeigten Temperatur. In der ersten Phase des Versuchs wird die Probe mittels der Halogenstrahler mit einem konstanten, rechteckförmigem Impuls beaufschlagt, durch welchen die Probe beginnt sich zu erwärmen. In der zweiten Phase schwingt sich das System ein und kühlt sich durch Wärmeleitung ab.

Die aufgenommenen Verläufe zeigen deutlich, dass sich Hardpoints und Spachtelbahnen im Zeitverlauf anders verhalten als das mit Luft gefüllte Wabenmaterial. Je nach Art und Dicke der Decklage sind auch Hardpoints und Spachtelbahnen in ihrer Oberflächentemperatur zu differenzieren. Physikalisch gesehen ist dies auf den oben beschriebenen Effekt der unterschiedlichen thermischen Materialeigenschaften zurückzuführen. Wie die Aufnahmen zeigen, erscheinen Hardpoints und Spachtelbahnen im Infrarotbild kälter als die stark isolierende Wabe.

Abbildung 7 verschafft einen Überblick der bisher thermographisch untersuchten Materialien und zeigt jeweils eine aus der Abkühlphase gewählte Momentaufnahme der Temperatur in Falschfarbendarstellung. Entscheidend für eine Weiterverarbeitung mittels digitaler Bildverarbeitung sind ein ausreichender Kontrast der zu detektierenden Merkmale zu ihrer Umgebung und eine homogene Ausleuchtung. Abbildung 7 zeigt, dass sich grundsätzlich alle Materialien in Bezug auf thermographische Prüfung transparent verhalten. Am problematischsten bei Ausleuchtung und Kontrast sind die Materialien 2 und 5, welche mit CFK-Gelege bzw. Abreißfolie als Decklage versehen sind. Hier gilt es im Folgenden optimierte Prüfparameter und ggf. andere Auswertungsmöglichkeiten zu finden.

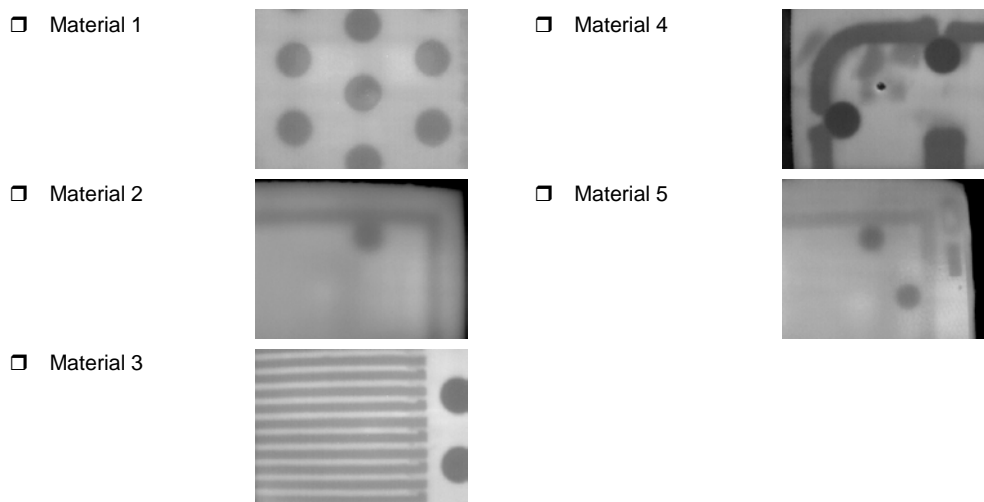
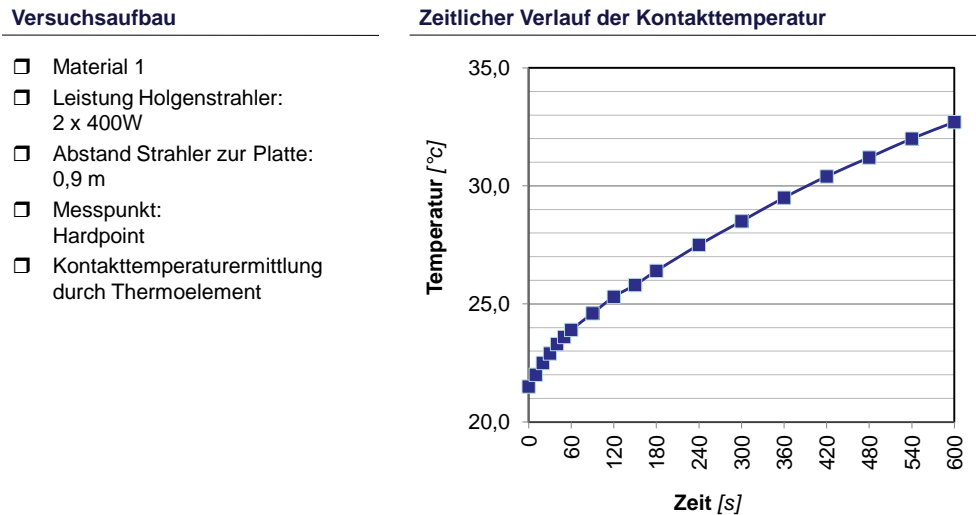


Abbildung 7: Vergleichende Übersicht der zu erreichenden Kontraste nach Material

Im obigen Abschnitt zur Verfahrensauswahl wird bei den thermischen Verfahren die Gefahr der Materialschädigung durch erhöhte Wärmeeinbringung als mögliches Problem dieser Prüftechniken erwähnt. Daher wurde ein Stichversuch zur Bestimmung des Kontakttemperaturverlaufs während der konstanten Bestrahlung im beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt.



MQS15\_0023.1

Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Kontakttemperatur

Abbildung 8 zeigt den Verlauf der mittels Thermoelement aufgenommenen Kontakttemperatur über Zeiten die weit über Versuchsbeleuchtungszeiten von 5 - 30 Sekunden hinaus gehen. Nach einer Beleuchtungszeit von 600 Sekunden wird bei Material 1 eine Temperatur von ca. 33 °C gemessen.

Die Voruntersuchungen zur Thermographie am IPMT legen klar die Vorteile des noch jungen und wenig etablierten Verfahrens dar. Mit verhältnismäßig geringem apparativen Aufwand (vgl. Abbildung 6) können bei allen intransparenten Materialien des Bauteilspektrums in der Luftfahrt ausreichende Kontraste erzeugt werden. Zu abschließenden Bewertung wurde eine vergleichende Untersuchung zum Ultraschallverfahren durchgeführt.

### Vergleichsuntersuchung Ultraschall

Ziel der vergleichenden Untersuchung zwischen Ultraschall und Thermographie war es, die Verfahren hinsichtlich der erreichbaren *Auflösung* und *Messgeschwindigkeit* einzustufen. Die Machbarkeitsuntersuchung für Ultraschallverfahren wurde durch das Ingenieurbüro Dr. Hillger an einer Auswahl von Materialien durchgeführt. Die Materialien sind so gewählt, dass nach Möglichkeit alle Extremwerte von Material und Dicken abgebildet sind.

Tabelle 3: Konfiguration des Ultraschallprüfaufbaus

→ Prüfverfahren	Impuls-Echo-Technik mit Wasserspaltankopplung
→ Ultraschallkopf	USPC 3010 VHF
→ Prüfkopf	15 MHz im Muse-Adapter
→ Software	Hillgus für Windows
→ Scanner	Isel Labor

Tabelle 3 zeigt die verwendete Prüfstandkonfiguration zur Ultraschalluntersuchung an den ausgewählten Sandwichbauteilen. Bei dieser Ultraschallprüfung werden Ultraschallkopf und Prüfkopf mittels eines Adapters, der mit Wasserspaltanbindung arbeitet, auf die Bauteiloberfläche aufgesetzt. Der Vorschub über die Bauteilausdehnung erfolgt durch Li-

nearachsen. Eine nachgelagerte Software wertet die Schallschwächung der reflektierten Ultraschallwellen aus, wobei ein sogenannte C-Scann der unter der Oberfläche liegenden Strukturen entsteht.

Für die zu erzielende Mindestauflösung von 0,3 mm in der Endanwendung wurde im Labor die Messkopfauflösung von 0,1 mm gewählt. Dies entspricht damit auch der Prüfbreite des Messgeräts. Auswertungen des Dämpfungsbildes zeigen sehr deutlich alle inneren Strukturen der Testbauteile. So sind unterhalb der intransparenten CFK-Decklage einzelne Wabenwände zuerkennen, welche Wandstärken im Bereich der geforderten Auflösung besitzen.

Als Vorschubgeschwindigkeit für den Prüfkopf wird durch den Hersteller ein Wertebereich von ca. 100 mm/s angegeben, welcher seine Grenzen durch die Wasserspaltankopplung erfährt. Die zu erreichende Flächenleistung für eine Ultraschallmessung lässt sich wie folgt durch die Multiplikation von gewählter Auflösung in x-Richtung (quer zur Messrichtung) und der möglichen Messgeschwindigkeit in y-Richtung berechnen.

$$\dot{A}_{\text{Ultraschall}} = \Delta_x \cdot v_{\text{Messung,y}}$$

Im Vergleich dazu kann die Flächenleistung einer thermographischen Messung über die gewünschte Auflösung pro Pixel und der Anzahl der Pixel in x- und y-Richtung geteilt durch die gesamte Messzeit berechnet werden.

$$\dot{A}_{\text{Thermographie}} = \frac{(n_x \cdot \Delta_x)(n_y \cdot \Delta_y)}{t_{\text{Messung}}}$$

Legt man die o.g. Werte für die Ultraschalluntersuchung zu Grunde, so erhält man eine Flächenleistung  $\dot{A}_{\text{Ultraschall}}$  von  $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Die Annahmen hinsichtlich der Auflösung für Thermographie werden ebenfalls bei 0,1 mm gewählt. Aus Abbildung 6 sind die Auflösung der Infrarotkamera am IPMT und Verfahrenszeiten bei den Grundlagenversuchen zu entnehmen. Verwendet man diese für die Berechnung, so erhält man eine deutlich größere Flächenleistung  $\dot{A}_{\text{Thermographie}}$  von  $36,7 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Diese kann möglicherweise in der Zukunft durch eine Reduzierung der Prozesszeit noch weiter gesteigert werden.

Neben der deutlich höheren Flächenleistung der Thermographie hat diese den entscheidenden Vorteil einer berührungslosen Messung gegenüber einer Wasserspaltanbindung für Ultraschall, was in der Regel die Störanfälligkeit von Messsystemen reduziert. Die Grundlagenuntersuchungen zur Thermographie zeigen zudem, dass dieses Verfahren sehr gut geeignet ist, um Merkmale in den Sandwichbauteilen zu detektieren. Im nächsten Schritten wurde aus den Voruntersuchungen und dem Stand der Technik zur thermographischen Untersuchung ein Konzept für ein Prüfverfahren und einen entsprechenden Demonstrationsaufbau abgeleitet.

#### **6.2.1.2.2 AP1b2 - Prüfkonzert und Demonstrationsaufbau**

Das *automatisierte Detektieren* ist das Kernarbeitspaket der automatisierten Vermessung und die Umsetzung erfolgte im Rahmen eines Prüfkonzerts und einem entsprechenden Demonstrationsaufbaus. Der Berichtsabschnitt gliedert sich in Analogie zu den entwickelten Komponenten des Konzerts und des Demoaufbaus wie folgt:

- Infrarot Aufnahme
- Infrarot Auswertung
- Konturauswertung

Abbildung 9 zeigt das Konzept des Demonstrationsaufbaus und die Schnittstellen zu anderen Bausteinen und Arbeitspaketen. Gesamtziel ist die Bestimmung der Ist-Lage ausgewählter Geometrielemente bezogen auf die Soll-Kontur und ein Referenzkoordinatensystem auf den Multi-Komponenten-Menüs. Die Komponenten werden aktuell im Auftrag der Elbe Flugzeugwerke in einer Maschine zur großflächigen Vermessung von Sandwichmenüs implementiert. Diese beinhaltet die - am IPMT erforschte - Detektion bei intransparenten Materialien mittels Infrarotverfahren. In enger Abstimmung entwickelte EFW eine ergänzende Technologie für die Erfassung von transparenten Materialien, welche in der Messmaschine ebenfalls integriert werden. Diese Technologien müssen mit unterschiedlicher Hardware umgesetzt werden, die Auswertung der Bilddaten und Extraktion gewünschter Merkmale wird hingegen analog und in einem System erfolgen.

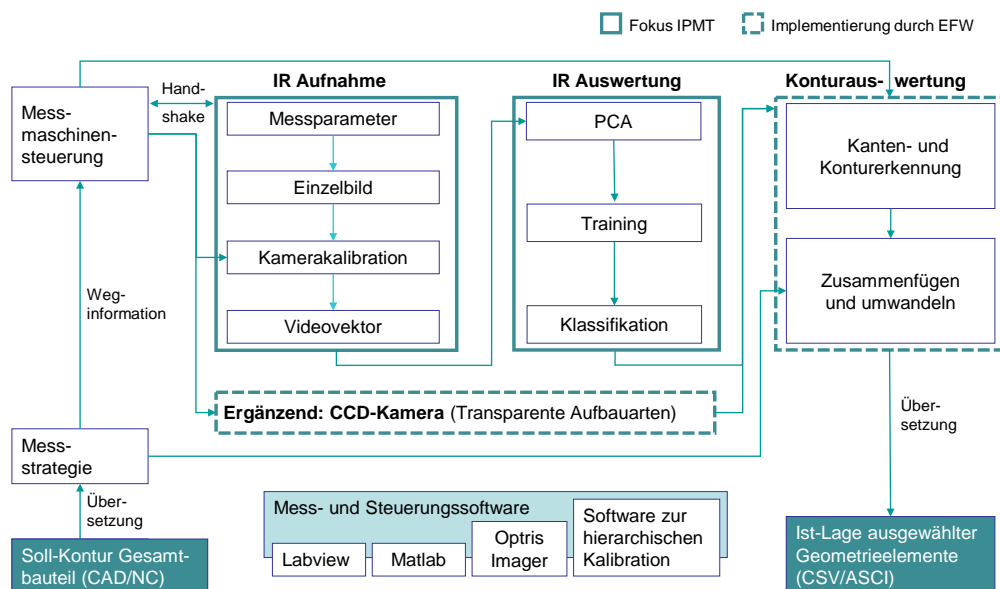


Abbildung 9: Komponenten des Demonstrationsaufbaus zur Bauteildetektion

Da eine 100%-Erfassung der Masterplatten aus Kostengründen nicht möglich – und auch nicht nötig – sein wird, müssen ausgewählte Bereiche der Masterplatten angefahren werden, um dort eine Messung durchzuführen. Der Kern der Messeinrichtung besteht aus drei Komponenten: *Infrarot-Aufnahme* und *-auswertung* sowie *Konturauswertung*. Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den einzelnen Komponenten detailliert beschrieben.

### Infrarot Aufnahme

Die geometrische Präzisionskalibration von Kameras ist notwendig, um eine ausreichende Genauigkeit von geometrischen Messungen zu erreichen, da es beispielsweise durch Linsenfehler Verzerrung im Randbereich des Bildes entstehen. Neben diesem direkt sichtbaren Effekt kommt es durch weitere Einbauungenauigkeiten zu in der Summe signifikanten Fehlern, die Messungenauigkeiten in der Größenordnung von mehreren Pixeln hervorrufen können (Wollnack, Wollnack 2011 – Implizite und explizite parametrische Modelle, 2011).

## Modellbildung

Obwohl es sich bei den verwendeten Bauteilen um ebene Strukturen und ein vermeintliches 2D-Messproblem handelt, muss eine Kalibration auf Grund von linearen Abhängigkeiten in den Parametern von Kalibrationsmodellen 3-dimensional durchgeführt werden, um ausreichende Genauigkeiten zu erreichen.

Zur geometrischen Kalibration von Kameras im Allgemeinen - aber auch Infrarotkameras im Speziellen - werden mehrdimensionale Kalibrierkörper im Raum angeordnet oder Kalibrierfelder verwendet (Luhmann, Luhmann 2010 - Geometric Calibration of Thermographic Cameras, 2010; Lagüela, González-Jorge, Armesto, & Herráez, Lagüela, González-Jorge et al. 2012 - High performance grid, 2012; Roelfs, 02.11.2011). Der Nachteil dieser Kalibrationsanordnung ist die Notwendigkeit extrem genauer Kalibrierkörperfertigung und/oder -positionierung. Ziel der Untersuchungen am IPMT war die Entwicklung einer geeigneten Kalibrationsprozedur für den beschriebenen Demonstrationsaufbau.

Abbildung 10 zeigt die Modellierung des Demonstrationsaufbaus wie dieser mit einem simplen 2D-Messmerkmal konfiguriert wurde. Bei der Messmarke handelt es sich um eine nach innen konische Bohrung in eine Sandwichplatte, die auf dem Bearbeitungszentrum eingebracht wurde und über mechanische Anschläge wiederholgenau in den Aufbau eingebracht wird. Anschließend wird die Kamera über die im Projekt entwickelte Spezialaufnahme mechanisch mit der Maschine verbunden. Die Maschine wird im Folgenden bei der Kalibration als Aktuator genutzt, um definierte und bekannte Bewegungen mit der Kamera durchzuführen.

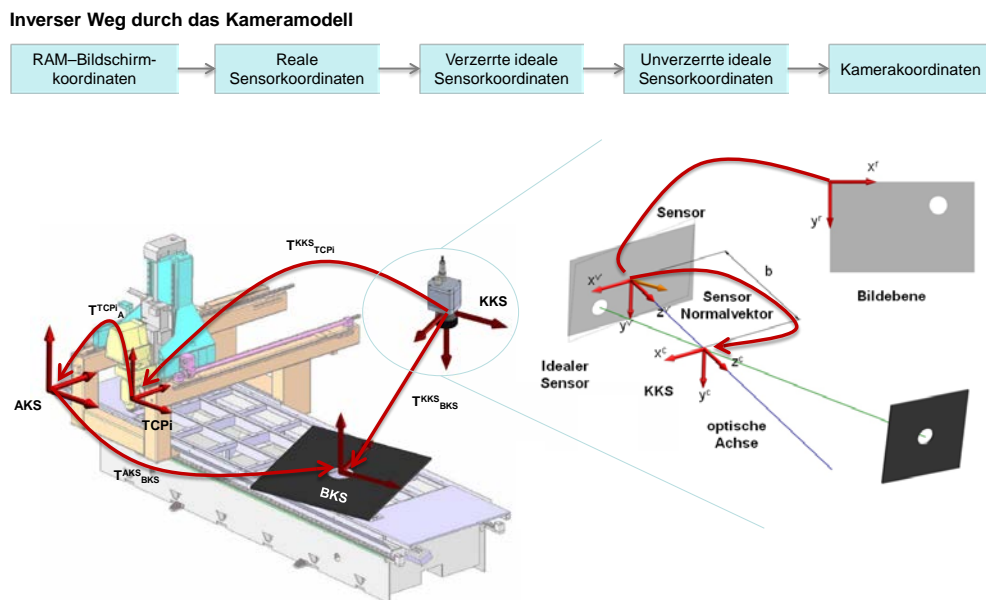


Abbildung 10: Modellierung des Kamera-Aktuator-Systems

Zur Kalibration ist eine Modellierung des Systems (Abbildung 10) notwendig, diese erfolgt in zwei Schritten:

1. Transformation Bauteil- zu Kamerakoordinatensystem
2. Transformation Kamera- zu RAM-Koordinatensystem

- a. Äußere Transformation
- b. Innere Transformation

Die Transformation vom Bauteil- zum Kamerakoordinatensystem erfolgt über die Verkettung von drei homogenen Transformationen:

$$\mathbf{T}(\mathbf{p}_{BKS}^{KKS}) = \mathbf{T}(\mathbf{p}_{TCPi}^{KKS}) * \mathbf{T}(\mathbf{p}_{AKS}^{TCPi}) * \mathbf{T}(\mathbf{p}_{BKS}^{AKS})$$

Eine homogene Transformation besteht aus drei rotatorischen und drei translatorischen Komponenten, die die Veränderungen einer Pose im Raum beschreiben. Der obere Formelzusammenhang beschreibt die Beziehung vom Bauteil/Kalibrierkörper zum Aktuatorkoordinatensystem, im Folgenden die Beziehung zwischen Aktuatorkoordinatensystem und  $i$ -ter Position des Tool-Center-Points (TCP) sowie der Beziehung zwischen  $i$ -ter TCP-Position und Kamerakoordinatensystem. Bei den ersten beiden Beziehungen handelt es sich um zeitlich konstante Verhältnisse. Dabei werden jeweils die Komponenten der Transformation als Modellparameter modelliert.

Die *äußeren Kameraparameter*, auch extrinsische Kameraparameter genannt, beschreiben die äußere Orientierung des körperfesten Kamerakoordinatensystems (KKS) zu einem Bezugskoordinatensystem. Das körperfeste Kamerakoordinatensystem liegt im Linsenzentrum und die  $z$ -Achse fällt mit der optischen Achse der Aufnahmekamera zusammen. Das Bezugskoordinatensystem kann hierbei wahlweise definiert und beispielsweise an das aufzunehmende Objekt gekoppelt werden. Üblich ist auch die Bezeichnung Weltkoordinatensystem (WKS).

Das *innere Kameramodell* (nach (Tsai & Lenz, 1989)) setzt sich aus acht Parametern zusammen, diese sind zur Annäherung an die innere Kamerageometrie wie folgt definiert:

1. **Bildweite**  $b$  - eine Kamerakonstante, beschreibt den Abstand zwischen dem Kamerakoordinatensystem und der Sensorebene. Die Bild- und die Objektweite  $g$  sind mit der Brennweite  $f$  durch die Linsengleichung miteinander verbunden
2. **Rotationssymmetrische Linsenverzerrungen**  $\chi$  - auch Verzeichnungen genannt, ist ein Abbildungsfehler, bei dem die Abbildung kein konstanten Abbildungsmaßstab aufweist. Dieser Effekt vergrößert sich in den Randbereichen und ist durch die Bauform des Objektivs beeinflusst.
3. **Kippwinkelfehler**  $\alpha_x, \alpha_y$  - durch Einbaufehler des Sensors, steht die optische Achse nicht senkrecht auf der Sensorebene. Daraus ergibt sich zwischen dem Normalvektor der realen Sensorebene und der optischen Achse ein Kippwinkel  $\alpha_x$  und  $\alpha_y$ .
4. **Skalierungsfaktoren**  $s_x, s_y$  - die Signalübertragung vom fotosensiblen Sensor in den Bildspeicher der Bildverarbeitungskarte, beruht auf der orts- und wertediskretisierenden Abtastung eines analogen Signals. Physikalisch gesehen handelt es sich bei modernen Chipsätzen um den Abstand zweier benachbarter Zellen
5. **Hauptpunkte**  $H_x, H_y$  - beschreiben die Position des Schnittpunkts der optischen Achse mit dem Sensor in Pixelkoordinaten. Die Hauptpunkte berücksichtigen den Positionsfehler des CCD-Sensors gegenüber einer nominell mittigen Einbaulage.

## Kalibrationsstrategie

Um die Parameter zu identifizieren, die den Zusammenhang zwischen Messwerten im RAM-Koordinatensystem (IR-Bild) und den gesuchten Messwerten am untersuchten Bauteil herstellen, wird die Kamera über dem Messmerkmal definiert verfahren. Dabei werden jeweils die RAM-Koordinaten des Merkmals im Bild ermittelt.

Abbildung 11 zeigt nun das Vorgehen mit den aufgenommenen Daten aus Kameraposition und gemessenen Koordinaten. Über das erstellte Modell werden mit geeigneten Startwerten für die Parameter rechnerisch Koordinaten bestimmt und von den gemessenen Werten abgezogen, so dass ein Minimierungsproblem entsteht. Durch den Einsatz einer Software zur Minimierung durch hierarchische Parameteridentifikation kann eine rangdefekta Lösung des Problems berechnet werden (Wollnack, Wollnack 2011 – Implizite und explizite parametrische Modelle, 2011). Der rechte Teil der Abbildung 11 zeigt wie die Hierarchiestufen für die Minimierung der Kameraparameter gewählt wurden.

- **Ziel**
  - Parameteridentifikation
    - äußeren Kameraparamter
    - innere Kameraparamter
  
- **Ansatz**
  - Least Square (Methode der kleinsten Quadrate)
  
- **Kamerakalibration als Minimierungsproblem**

$$\text{Min}_p \left\{ \sum_{i=1}^N \|r_i(p)\|_E^2 \right\} \quad r_i(p) = (T(P_{BKS}^{KKS}))^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} z \\ b \\ f_C^{IV}(p_{IC}, x_i^{RAM}) \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$
  
- **Lösung des Minimierungsproblems durch Hierarchische Parameteridentifikation**
  - Wahl bestmöglicher Startwerte
  - Festlegung der zu identifizierbaren Parameter zu der jeweiligen Hierarchiestufe nach Kopplungseffekten zwischen den Parametern separiert
  - Nachiteration über alle Parameter

**Hierarchische Kalibration:** Vierstufiges Verfahren

Parameter		Hierarchiestufe			
		1	2	3	4
Äußere Parameter	t <sub>x</sub> KKS – TCP	X	X	X	X
	t <sub>y</sub> KKS – TCP	X	X	X	X
	t <sub>z</sub> KKS – TCP	X	X	X	X
	Θ <sub>x</sub> KKS – TCP	X	X	X	X
	Θ <sub>y</sub> KKS – TCP	X	X	X	X
	Θ <sub>z</sub> KKS – TCP	X	X	X	X
Innere Parameter	Bildweite b	X			X
	Rotationssym. Linsenverzerrung χ			X	X
	Kippwinkel α <sub>x</sub>		X	X	X
	Kippwinkel α <sub>y</sub>		X	X	X
	Skalierungsfaktor S <sub>x</sub>			X	X
	Skalierungsfaktor S <sub>y</sub>				X
	Hauptpunkt H <sub>x</sub>				X
Hauptpunkt H <sub>y</sub>				X	

Abbildung 11: Parameteridentifikation durch hierarchische Kalibration

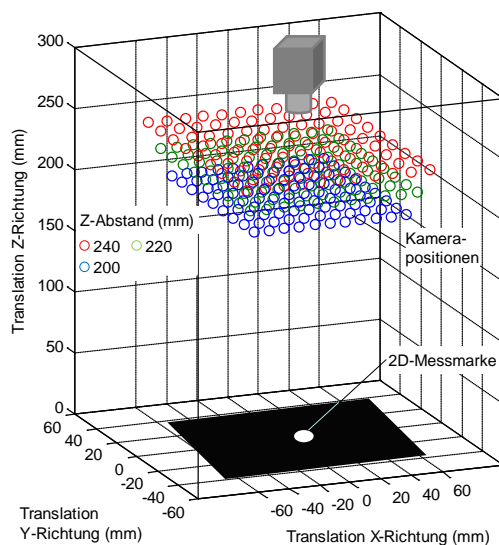
Im Rahmen der Untersuchungen zur Kamerakalibration wurde eine Versuchsreihe mit drei Kalibrationsdurchläufen definiert, diese sind in Abbildung 12 detailliert dargestellt und beschrieben.

	I Translatorisch, ohne C-Achse	II Translatorisch, mit C-Achse	III Versuch II, zehn Wiederholungen
<b>Verfahrensweise</b>	<input type="checkbox"/> Translatorisch <input type="checkbox"/> C-Achse in Nullstellung <input type="checkbox"/> 297 Posen <input type="checkbox"/> Drei z-Ebenen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 200 mm</li> <li>▪ 220 mm</li> <li>▪ 240 mm</li> </ul> <input type="checkbox"/> Pro Pose drei Messungen → Mittelwert	<input type="checkbox"/> Translatorisch <input type="checkbox"/> C-Achse (0°, 10°, 70°) <input type="checkbox"/> 699 Posen <input type="checkbox"/> Drei z-Ebenen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 200 mm</li> <li>▪ 220 mm</li> <li>▪ 240 mm</li> </ul> <input type="checkbox"/> Pro Pose drei Messungen → Mittelwert	<input type="checkbox"/> Translatorisch <input type="checkbox"/> C-Achse (0°, 10°, 70°) <input type="checkbox"/> 699 Posen pro Wdh. <input type="checkbox"/> Drei z-Ebenen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 200 mm</li> <li>▪ 220 mm</li> <li>▪ 240 mm</li> </ul> <input type="checkbox"/> Pro Pose drei Messungen → Mittelwert <input type="checkbox"/> Insgesamt zehn Wiederholungsmessungen
<b>Warum</b>	<input type="checkbox"/> Drei Maschinen Freiheitsgrade <input type="checkbox"/> Erhöhte Kopplung in x-y Ebene	<input type="checkbox"/> Vier Maschinen Freiheitsgrade <input type="checkbox"/> Reduktion Kopplung in x-y Ebene	<input type="checkbox"/> Nachweis der Wiederholgenauigkeit der Kalibration

Abbildung 12: Übersicht der drei Kalibrationsversuche

Im ersten Versuch (Details in Abbildung 13) wurde ein x-y-Punktraster in drei z-Ebenen abgefahren, so dass ein 3D-Punktfeld entsteht.

Kameraposition über Messmarke

**Konfiguration Versuch I**

- Orthogonale Kalibration
  - 11 X-Positionen
  - 9 Y-Positionen
  - 3 Z-Ebenen mit zunehmenden X- und Y-Translationen zur vollständigen Abdeckung Sichtfeld
- B- und C-Achse in Nullstellung

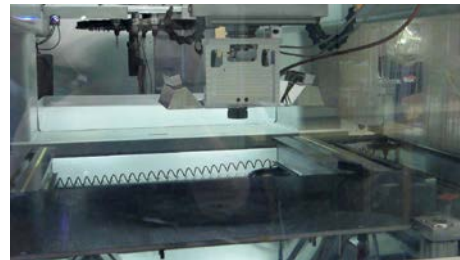


Bild des Messaufbaus

Abbildung 13: Versuchsaufbau Kalibration mit Kamerapositionen über der Messmarke

Da bei Versuch I eine hohe Kopplung von Parametern in der x-y-Ebene vermutet wurde, beinhaltet der Versuch II eine Rotation der Maschinen C-Achse, welche in der Richtung der optischen Achse der Kamera, also senkrecht um die x-y-Ebene, dreht. Im Versuch III sollte festgestellt werden, ob die Kalibrationsversuche mit ausreichender Wiederholgenauigkeit durchgeführt werden können, dazu wurde der Versuch II mehrfach durchgeführt.

**Ergebnisse der Kalibration**

In einen ersten Schritt musste das erstellte Modell auf Vollständigkeit und Richtigkeit überprüft und in Verbindung mit der modifizierten Software (Wollnack, Wollnack 2011 –



Implizite und explizite parametrische Modelle, 2011) getestet werden. Dazu wurde der in Abbildung 12 und Abbildung 13 beschriebene Versuch I durchgeführt.

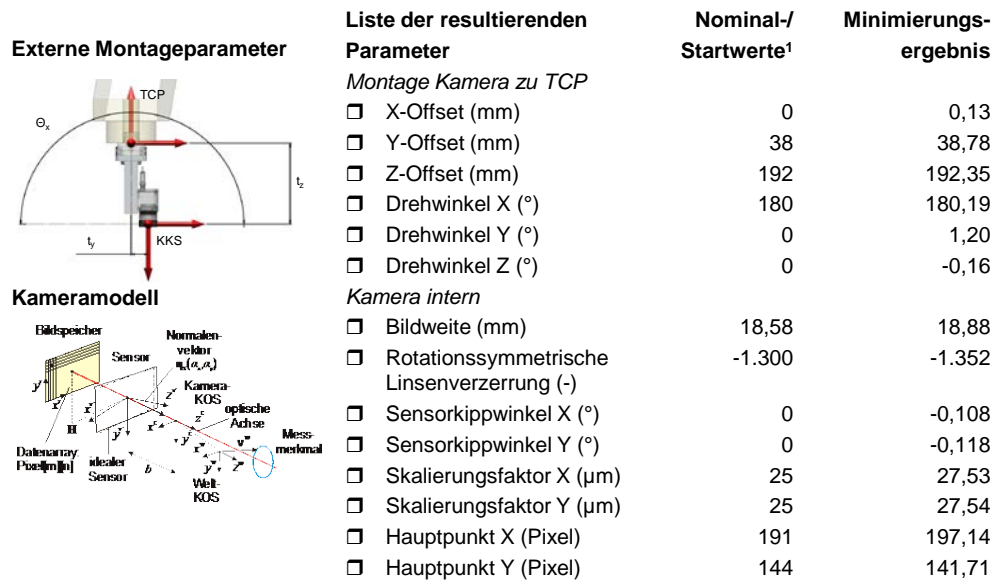


Abbildung 14: Darstellung der Ergebnisse Kalibrationsversuch I

Abbildung 14 zeigt als Ergebnis von Versuch I den Vergleich der Parameterstartwerte und den Parameterwerten nach hierarchischer Kalibration. Bei den Start- oder Nominalwerten handelt es sich um Angaben des Kameraherstellers, Informationen aus der Konstruktion der Kameraaufnahme und Erfahrungs- bzw. Literaturwerten (Wollnack, Wollnack 2011 – Implizite und explizite parametrische Modelle, 2011). So ist z.B. das Kamerakoordinatensystem konstruktionsbedingt um 180° zum TCP-Koordinatensystem gedreht. Bedingt durch Einbautoleranzen ist für diesen externen Montageparameter ein Wert von 180,19° ermittelt worden.

Der Skalierungsfaktor wird bei modernen Kameras 1:1 aus der Geometrie des Sensors abgeleitet. Bei der verwendeten Optris PI400 wird die Zellengröße mit 25 µm angegeben. Das Minimierungsergebnis zeigt, dass der eigentliche Abstand zwischen den Sensorzellen bedingt durch Elektronik um ca. 2,5 µm größer ist, was zu einem anderen Übersetzungsverhältnis von physikalischem Bild auf dem Chip in eine Bildschirmanzeige resultiert. Am eindrucksvollsten und am anschaulichsten zeigt sich die Notwendigkeit der Kalibration bei der Bestimmung der Hauptpunkte. Die Startwerte wurden als Mitte des Chips mit einer Auflösung von 382 x 288 mit 191 und 144 gewählt. Als Ergebnis der Kalibration weichen diese um 6 bzw. 3 Pixel ab. Überträgt man dies in den Weltmaßstab entstehen dadurch bei der gewählten Auflösung von 0,33 mm ein Positionsmessfehler von 2 bzw. 1 mm. Hingegen liegt der wirkliche Einbaufehler des Chips nur bei 150 bzw. 75 µm.

Der mittlere Fehler im Weltmaßstab liegt nach der Kalibration rechnerisch für die kalibrierten Punkt bei 35 µm. Dabei handelt es sich um den durchschnittlichen Betrag der Ortabweichung von Messung und kalibriertem Modellwert. Abbildung 15 visualisiert in der linken Hälfte eben diesen Fehlerbetrag je Messstelle bezogen auf die Sensorposition. Bei einer Auflösung von 0,33 mm pro Pixel entspricht dies einer Güte von 1/10 Pixel. In der Literatur wird 1/20 Pixel als Grenze für den erreichbaren systematischen Fehler angegeben (Wollnack, Wollnack 2011 – Implizite und explizite parametrische Modelle, 2011).

**Versuch I:** Durchschnittlicher Fehler nach hierarchischer Kalibration beträgt  $35\ \mu\text{m}$  entspricht ca. 1/10 Pixel

**Versuch II:** Durchschnittlicher Fehler nach hierarchischer Kalibration beträgt  $72\ \mu\text{m}$  entspricht ca. 1/4 Pixel

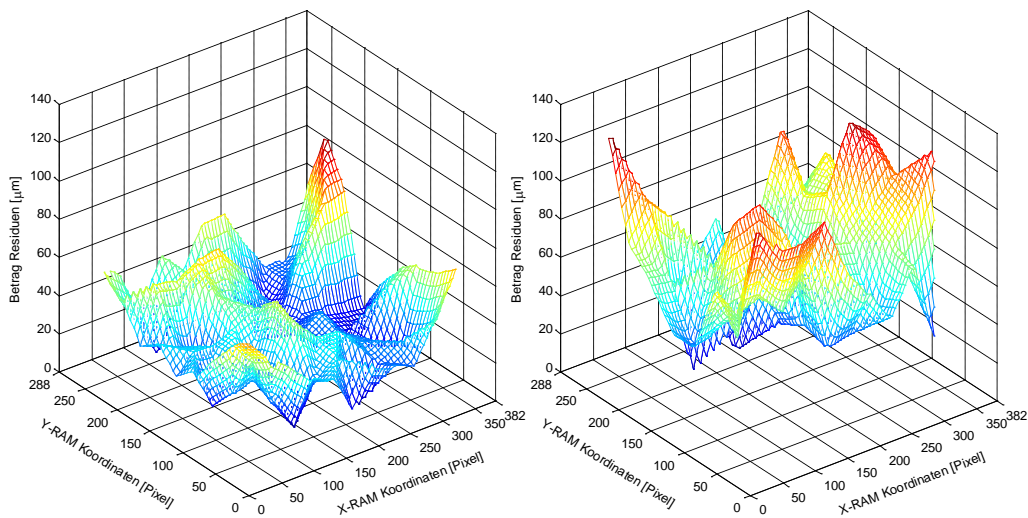


Abbildung 15: Visualisierung und Vergleich der Güten aus Kalibrationsversuchen

Da im Versuch I zwar zufriedenstellende Güten in der Kalibration erreicht wurden, jedoch hohe Kopplungen zwischen den Parametern in der x- und in der y-Ebene vorliegen, wird im Versuch II eine weitere Achse des Bearbeitungszentrums genutzt, um die Kopplungen zu eliminieren. Wie in Abbildung 12 gegenüber gestellt wird der Versuch I um zwei weitere, nicht orthogonale Stellungen der C-Achse erweitert.

In der rechten Hälfte der Abbildung 15 sind die Residuen für den Versuch II visualisiert. Es zeigt sich, dass zwar die Kopplungen laut Software deutlich reduzierte werden konnten, sich jedoch im Durchschnitt die Güte auf über  $70\ \mu\text{m}$  verschlechtert. Da die Konvergenz des Algorithmus durch die Entkopplung der Parameter deutlich besser ist, muss die Verschlechterung der Güte auf die Maschinenhardware zurückzuführen sein. Demnach ist das Positionierverhalten der Rotationsachse der Maschine weniger genau als auf den bisher genutzten Linearachsen.

Im dritten und letzten Versuch sollte nun die Wiederholgenauigkeit der Kalibration überprüft werden. Dazu wurde der Versuch II in 10facher Wiederholung durchgeführt. Zu den in Abbildung 16 dargestellten Ergebnissen ist anzumerken, dass hierfür wegen eines Hardware-Tausches eine andere Kamera desselben Modells verwendet wurde. Deutliche zeigt sich dies an der Verschiebung der ermittelten Kamera-Hauptpunkte, an denen die optische Achse idealisiert den Sensor trifft.

**Kalibrationsergebnisse: Micro-Epsilon TIM 400**

Parameter		Nominal-/Startwerte	Mittelwert	Standardabweichung
Äußere Parameter	$t_x$ KKS – TCP [mm]	0	-0,36	0,21
	$t_y$ KKS – TCP [mm]	38	-37,61	0,11
	$t_z$ KKS – TCP [mm]	192	-199,34	0,56
	$\Theta_x$ KKS – TCP [°]	180	179,29	0,02
	$\Theta_y$ KKS – TCP [°]	0	-0,43	0,04
	$\Theta_z$ KKS – TCP [°]	0	89,30	0,01
Innere Parameter	Bildweite b [mm]	18,58	18,76	0,05
	Rotationssym. Linsenverzerrung $\chi$	-1300	-1368,96	20,87
	Kippwinkel $\alpha_x$ [°]	0	0,14	0,10
	Kippwinkel $\alpha_y$ [°]	0	0,09	0,06
	Skalierungsfaktor $S_x$ [ $\mu\text{m}$ ]	25	27,50	0,01
	Skalierungsfaktor $S_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	25	27,50	0,01
	Hauptpunkt $H_x$ [Pixel]	191	194,87	0,35
Hauptpunkt $H_y$ [Pixel]	144	147,96	0,14	

Abbildung 16: Kalibrationsversuch III – Wiederholgenauigkeit

Speziell die Skalierungsfaktoren  $S_i$  lassen sich mit sehr hoher Wiederholgenauigkeit ermitteln, da diese als mechanische Größe (Pixelabstand auf dem Sensor) den entscheidenden Einfluss auf die Güte nehmen und in der Minimierung erst in einer späten Hierarchiestufe ermittelt werden. Verhältnismäßig hohe Standardabweichungen zeigen sich im Sensor-kippwinkelfehler oder auch in der z-Komponente der externen Montageparameter. Die hohe Streuung der Messwerte ist auf Kopplungen zurückzuführen, die durch die Verwendungen einer weiteren Raumachse zu reduzieren wäre. Eine solche steht aber am 5-Achs-CNC-BAZ des IPMT nicht zur Verfügung. In der Summe sind jedoch die erreichten Güten zwischen  $\frac{1}{4}$  und  $\frac{1}{10}$  Pixel sehr zufriedenstellend, da bei der unkalibrierten Kamera von Fehlern bis zu 10 Pixeln ausgegangen werden musste.

Abbildung 17 visualisiert abschließend den Effekt der Kalibration an einer Beispiel-IR-Aufnahme von einem Stopfen sowie zwei Abschnitten Spachtelmasse in einer GFK-Material mit Polymerschuttfolie.

- Entzerrung des gesamten Bildes durch z.B.:
    - Linsenverzerrung
    - Sensorkippwinkelfehler
    - etc.
  - Im Randbereich Fehler in der Größenordnung mehrerer Pixel
- Rechenzeit von mehreren Minuten ermöglicht nur die Umrechnung von einzelnen Bildkoordinaten

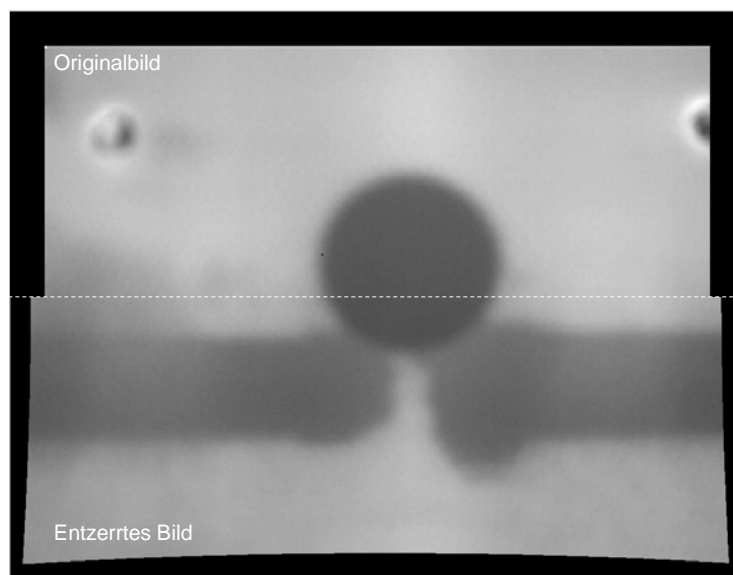


Abbildung 17: Vollständige, subpixel-genaue Entzerrung mittels Kalibrationsdaten

Im oberen Bereich ist das Originalbild dargestellt. Diese wurde anhand der ermittelten Kameraparameter und des entwickelten Systemmodells entzerrt. Die Entzerrung konnte durch Verhundertfachen der Auflösung des Originalbilds auf Sub-Pixel-Ebene durchgeführt werden. Speziell in den Randbereichen zeigt sich deutlich der Effekt der korrigierten Linsenverzerrung. Auf Grund von Rechenzeiten von mehreren Minuten ist eine Entzerrung von vollständigen Aufnahmen nicht dauerhaft denkbar, da jedes einzelne Pixel anhand des Systemmodells umgerechnet werden muss. Im geplanten Serienprozess werden die Merkmale im verzerrten, unkalibrierten Bild extrahiert und deren Koordinaten im Anschluss auf unverzerrte Werte umgerechnet

### Infrarot Auswertung

Nach der IR-Erfassung schließt sich nach Abbildung 9 im dargestellten Demonstrationsaufbau die Auswertung der IR-Bilder an. Diese werden als zeitliche Sequenz von Einzelaufnahmen über die Anregungs- und Abkühlphase von der Aufnahme-Komponente übergeben.

Abbildung 18 zeigt den Vergleich zwischen der Auswertung eines Einzelbildes und der einer Videosequenz. Bei der Einzelbildauswertung wurde aus dem Zeitverlauf manuell eine Aufnahme mit dem optisch höchsten Kontrast ausgewählt. Mit Hilfe eines Schwellwertalgorithmus wird diese dann binarisiert, um über eine Bilderkennung Formen zu detektieren. Deutlich ist in der Auswertung zu erkennen, dass die leicht unregelmäßige Ausleuchtung der Sandwichplatte die unter der Oberfläche liegenden Spachtelbahnen ineinander verschwimmen lässt. Dieses Problem zeigt die Notwendigkeit einer anderen, optimierten Auswertungsalgorithmik.

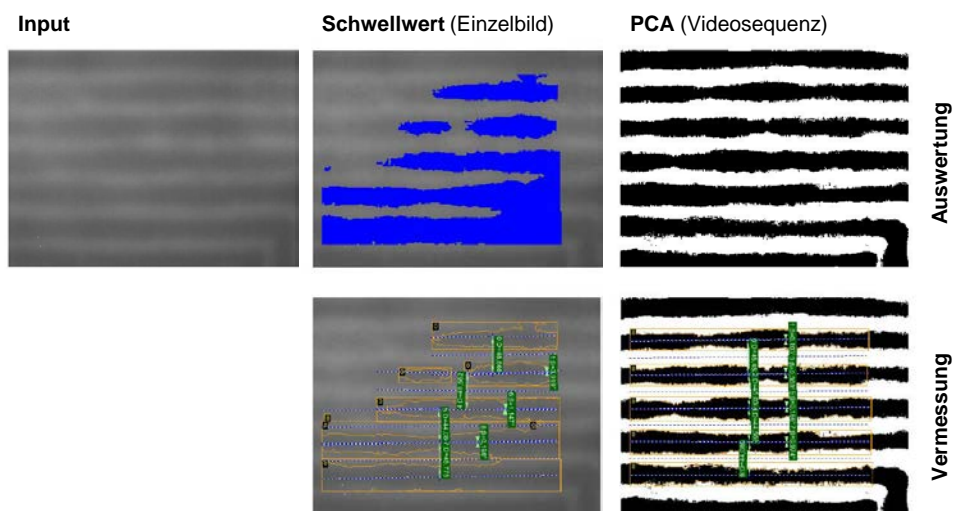


Abbildung 18: Vergleich der Bildauswertung mit Schwellwertalgorithmus und PCA

Im Grundsatz geht es bei der Verbesserung um die Stärkung des Kontrastes zwischen den unterschiedlichen Materialien. Eine Veröffentlichung von Rajic zeigt dazu einen theoretischen Ansatz in der Nutzung der Hauptkomponentenanalyse/Principal Component Analysis (PCA) (Rajic, Rajic 2002 – Principal component thermography for flaw, 2002). Neuere Überlegungen zeigen, dass die PCA in Kombination mit statischen Klassifikationsansätzen sehr gut für Materialanalysen geeignet ist (Marinetti, et al., 2004). Mittlerweile hat sich der Ansatz schon in andere Wissenschaftsbereiche fortgesetzt und so wird die Idee ebenfalls

in der Brustkrebserkennung weiterverfolgt (Boquete, Ortega, Miguel-Jiménez, Rodríguez-Ascariz, & Blanco, 2012). Im rechten Teil der Abbildung 18 ist - im Vergleich zur Einzelbildauswertung - der deutlich verbesserte und gleichmäßigere Kontrast zu sehen.

Abbildung 19 stellt den Informationsfluss innerhalb des Auswertungsalgorithmus dar. Die Videosequenz wird in einem ersten Schritt in eine zweidimensionale Vektorform überführt, um über eine Singularitätswertzerlegung eine PCA durchzuführen. Dabei wird der Zeitverlauf jeden einzelnen Pixels in einen niedriger dimensional Subraum projiziert und so eine Datenreduktion erreicht.

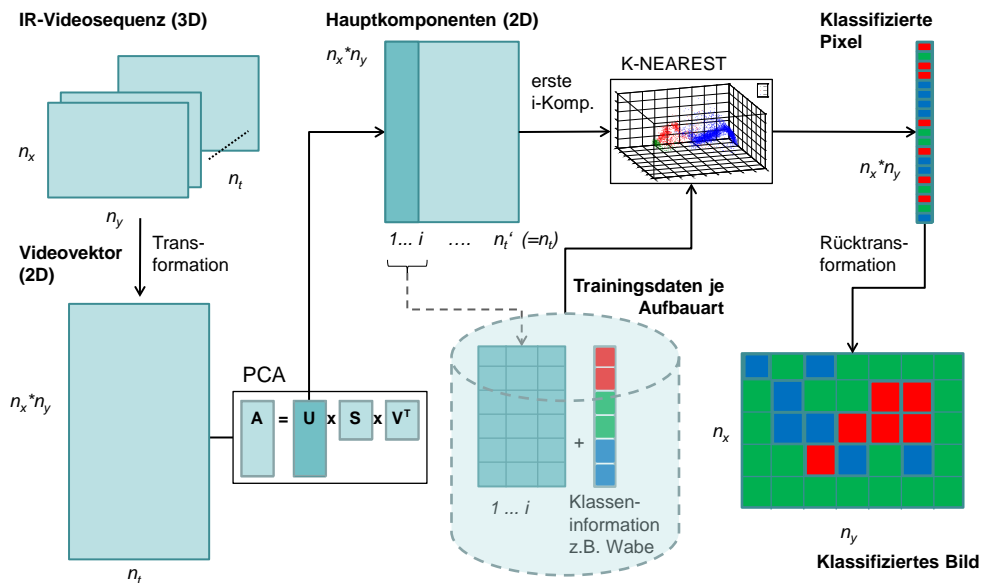


Abbildung 19: Datenflusskonzept für die IR-Auswertung

Eine Visualisierung der erwähnten Datenreduktion ist in Abbildung 20 dargestellt. Dabei werden die ersten  $i$  Spalten der Hauptkomponenten in ein Einzelbild zurücktransformiert und auf einer normierten Falschfarbenskala dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Hauptkomponenten eins bis drei sehr viele Informationen und entsprechend gutem Kontrast über den Zeitverlauf beinhalten. Hauptkomponenten vier und fünf enthalten noch sichtbare Informationen über die Geometrie, wogegen Hauptkomponenten sechs bereits vorwiegend Rauschen zeigt. Bei einer Messfrequenz von 1 Hz und einer Gesamtaufnahmezeit von 30 s entstehen 30 Aufnahmen, die im Videovektor vorliegen. Diese können über die PCA so transformiert werden, dass nur noch die ersten eins bis fünf Hauptkomponenten von geometrischer Relevanz sind. Die so erreichte Datenreduktion verringert den kombinatorischen Vergleichsaufwand für einen Klassifizierer deutlich.

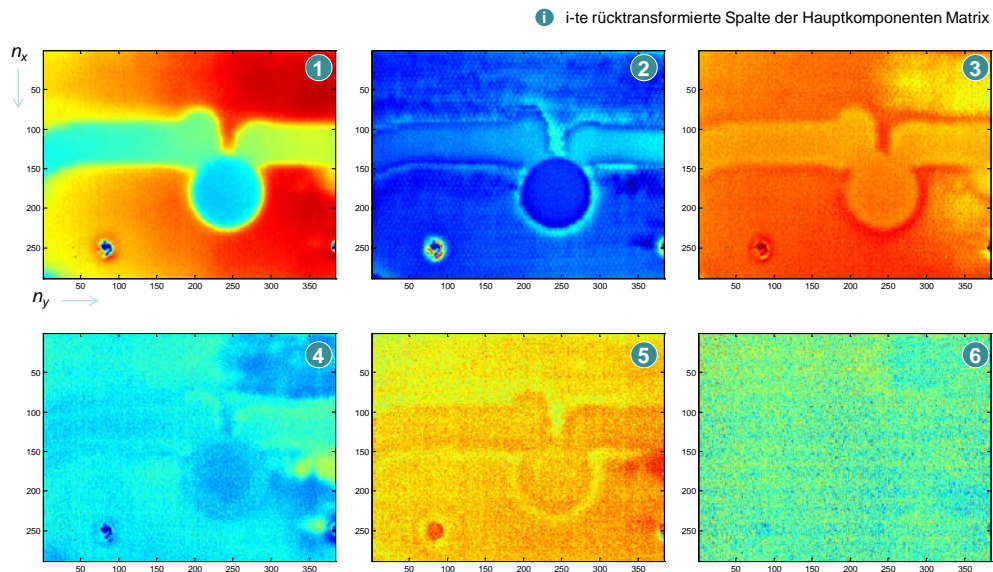


Abbildung 20: Visualisierung des Informationsgehalts der Hauptkomponenten

Um eine Klassifikation der Pixel zu erreichen, müssen Vorabinformationen über den Zeitverlauf der zu differenzierenden Materialien vorliegen. Ein erster Test wurde an einer einseitig intransparenten Material durchgeführt, um den Klassifizierer mit Eingangsinformationen zu versorgen. Dazu wurden ca. 5 % der Pixel manuell nach Wabe, Spachtelbahn und Stopfen klassifiziert, um beispielhafte Zeitverläufe als Vergleichsgrundlage vorliegen zu haben. Langfristig muss je Material, Beleuchtungseinstellungen und ggf. weiteren Parametern eine Eingangsinformation bereitgestellt werden. Diese wird in umfangreichen Messungen zu sammeln sein und ist in Abbildung 19 als ‚Trainingsdaten je Material‘ bezeichnet. Der Klassifizierer vergleicht den Zeitverlauf der Messpunkte mit denen der sogenannten ‚Trainingsdaten‘ und ordnet den jeweils ‚am nächsten liegenden‘ Wert zu.

Abbildung 21 veranschaulicht die Funktionsweise der Klassifikation von Pixeln mit  $n$  korrespondierenden Informationen für den drei-dimensionalen Fall. Es sind auf den drei Achsen die ersten drei Hauptkomponenten der Trainingsdaten aufgetragen. Die Achsen zeigen einen dimensionslosen Wert, der nicht mehr direkt an eine physikalische Größe in der Messung gekoppelt ist. Entstanden sind diese jedoch – wie oben beschrieben – durch eine zeitliche Transformation des Temperaturverlaufs. Der Vorteil der Trainingsdaten ist, dass eine Zuordnung der Pixel zu Wabe, Spachtelbahn und Stopfen möglich ist, da es sich um eine bekannte Geometrie handelt. Man sieht in der Abbildung 21 deutlich die ‚räumliche‘ Trennung der verschiedenen Phasen und könnte diese bspw. auch durch eine Hüllgeometrie umschließen (Lucieer, 2004). Der sogenannte ‚k-nearest‘-Klassifizierer nutzt das Wissen über den Zusammenhang über die räumliche Lage und die Zugehörigkeit zu einer Klasse (hier Material: Wabe, Spachtelbahn oder Stopfen). Wird ein Pixel unbekannter Klassenzugehörigkeit an den Klassifizierer übergeben, so prüft dieser die Nähe zu den bekannten Pixeln und entscheidet anhand des durchschnittlichen Abstands über die Klassenzugehörigkeit.



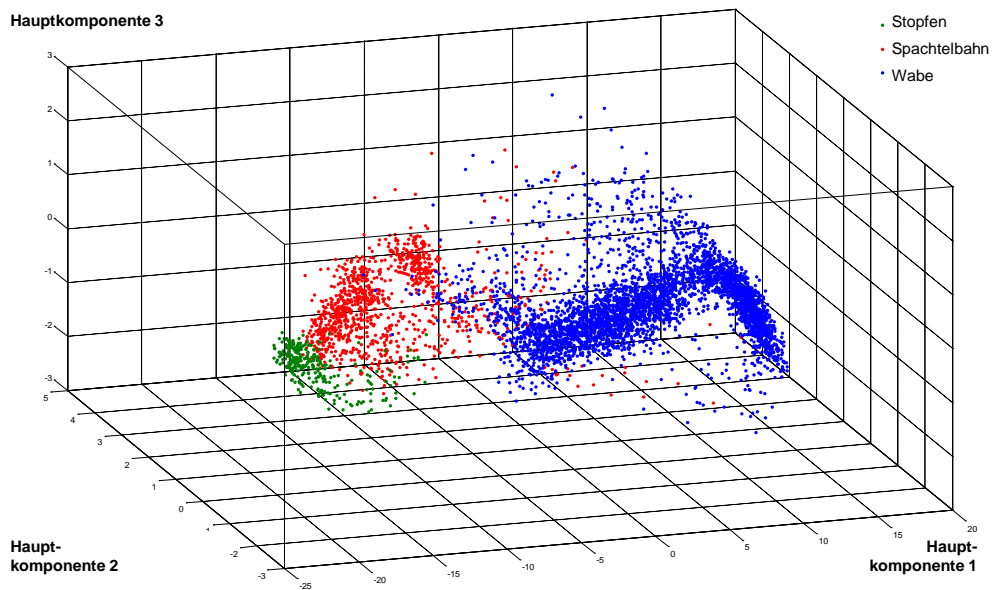
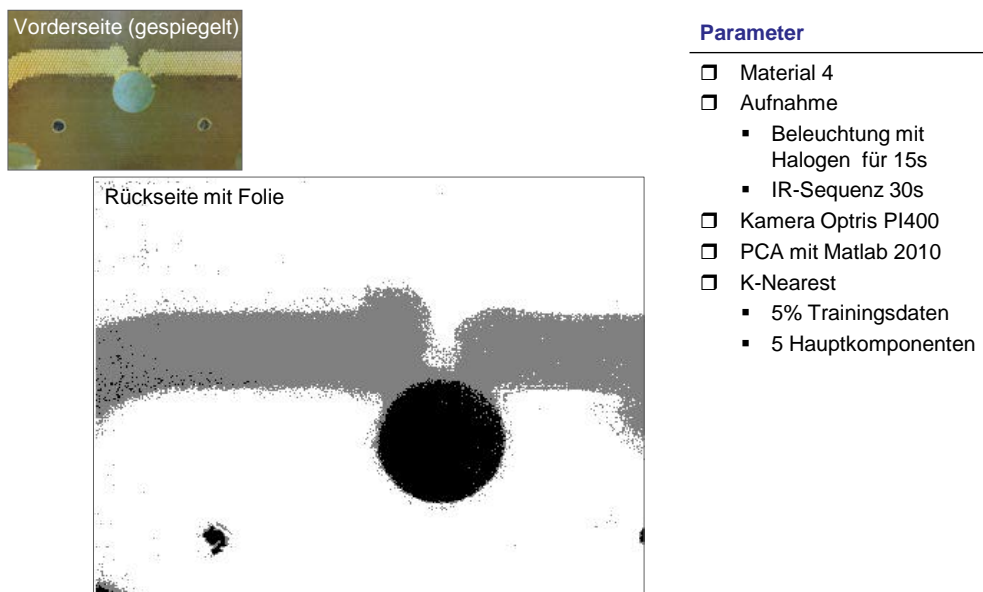


Abbildung 21: Visualisierung des n-dimensionalen Klassifikationsansatzes

In Abbildung 22 ist das Ergebnis der Machbarkeitsuntersuchung dargestellt. Zum einen die Vorderseite des Bauteils, welche transparent ist. Die Rückseite ist mit intransparenter Folie beklebt und wurde mit den beschriebenen Algorithmen analysiert. Es zeigt deutlich, dass eine weitgehend trennscharfe Unterscheidung der Materialien unter der Folie möglich ist.



MQS15\_0067.2

Abbildung 22: PCA-Algorithmus in der Anwendung auf Sandwichplatten

Die bisher dargestellten Untersuchungen zur IR-Prüfung zeigen, dass sich die Auflichtimpulsthermographie sehr gut dazu eignet Kontraste an der Decklage von intransparenten Sandwichmaterialien zu erzeugen. Die *Infrarot-Auswertung* – speziell die Kontrastverbesserung durch Principal Component Analysis (PCA) und *Klassifikation* – wurden im Rahmen des Projekts in den Demoaufbau integriert und erfolgreich getestet. In einem weiteren

Schritt wurde die Absicherung unter industrieüblichen Bedingungen und die Verbesserung der Trainingsdaten (*Training*) untersucht.

### **Absicherung**

Es wurde mit EFW ein Layout für Trainingsplatten definiert. In den vier Quadranten sind jeweils Kombinationen verschiedener Einlegeteile und Spachtelkonturen integriert, wie diese der Sandwichkonstruktion in Extremfällen auftreten können. Damit soll in den Trainingsplatten ein möglichst breites Bild der betrieblichen Realität abgebildet werden. Ein Quadrant ist vollkommen ohne Spachtelmasse und Formelement gestaltet und dient als Referenzfläche. Die Trainingsplatten können in verschiedenen Materialien hergestellt werden.

Die Formelementkombinationen können mit dem entwickelten Thermografie-Verfahren (Principal Component Thermography) untersucht werden, die Ergebnisse der bekannten Formelemente manuell klassifiziert und die so gewonnen Informationen als Trainingsdaten hinterlegt (siehe dazu Abbildung 19).

Der wesentlich weitere Schritt war die Absicherung des Konzepts unter industriell auftretenden Bedingungen. Dazu zählte neben umfangreichen Abstimmungen zu den Schnittstellen auch die Durchführung von Experimenten zur Absicherung des Betriebs der Messmaschine unter Serienbedingungen. Dazu wurden folgende Konstellationen identifiziert, die möglicherweise zu Problemen führen können:

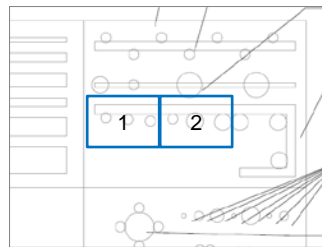
- Doppelbelichtung durch dicht aneinander liegende Merkmale
- Laminatüberlappungen im Bereich zu detektierender Merkmale

Im Folgenden werden die Problemlage und die Untersuchungsergebnisse der beiden Problemfälle näher erläutert.

Zur ‚Doppelbelichtung‘ kann es kommen, wenn in der Messstrategie zwei Merkmale als detektionsrelevant identifiziert werden, welche dicht neben einander liegen und daher die Messbereiche direkt aneinander grenzen oder sogar leicht überlappen. Der möglicherweise negative Einfluss wird durch die Lichtausbreitung am Reflektorblech noch verstärkt. Der bei der Thermographie genutzte Effekt zur Kontrasterzeugung beruht auf der unterschiedlichen Aufwärmung und Abkühlung der Materialien. Wird nun für die Aufnahme 1 die Messfläche bestrahlt, wärmt sich ein Teilbereich der Aufnahme 2 bereits auf. Abbildung 23 zeigt die Wahl der direkt benachbarten Merkmale auf der entwickelten Kalibrationsplatte.



- **Kontext:** Im Serienbetrieb werden die Detektionsmerkmale von der Messmaschine angefahren. Liegen diese räumlich dicht zusammen, kann der Bereich der sich anschließenden Messung bereits ‚vorgewärmt‘ sein.
- **Versuch:** Zwei Aufnahmen in direkter Abfolge



□ Aufnahme

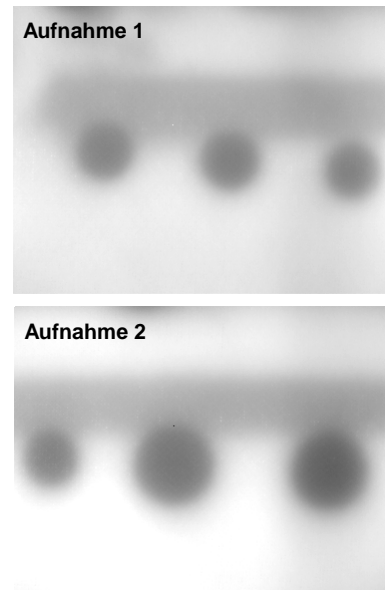


Abbildung 23: Problemstellung für Doppelbelichtungsversuche

Die Bilder als Ausschnitt der Aufnahme 1 und Aufnahme 2 im rechten Teil der Abbildung 23 zeigen den vermuteten Effekt der ‚Vorwärmung‘ im linken Teil der Aufnahme 2. Die Abkühlraten sind zu gering als dass sich die Temperatur innerhalb der Positionierzeit der Messmaschine angleicht. Es bleibt festzuhalten, dass sich Aufnahmen in dichter zeitlicher und örtlicher Abfolge thermisch beeinflussen. Daher ist die Auswirkung auf die Detektierbarkeit zu prüfen. Alle Versuche wurden mit einer Aufwärmzeit von  $t_h = 15$  s und Abkühlzeit  $t_c = 15$  s bei einer Messfrequenz von  $f_m = 1$  Hz durchgeführt.

Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der Detektion bei Doppelbelichtungsversuchen. Dazu wurde mittels der Aufnahme 1 und der dazu gehörigen IR-Sequenz mit dem bekannten Verfahren eine Trainingsdatei erstellt. Das Ergebnis der Detektion ist oben rechts in der Abbildung dargestellt. Mit denselben Trainingsdaten wurde auch die Aufnahme 2 ausgewertet. Eine Beeinflussung der Detektierbarkeit konnte dabei nicht festgestellt werden und kann durch die Visualisierung der Trainingsdaten (Abbildung 25) bestätigt werden.

Abbildung 25 zeigt die übliche Darstellung der ersten drei Komponenten der PCA, welche in den Trainingsdaten (blau) enthalten sind. Wabe und Stopfen sind hier klar zu differenzieren. Zusätzlich ist ein Ausschnitt der zu klassifizierenden PCA-Daten (grün) der Aufnahme 2 dargestellt. Es zeigt sich eine geringfügige Verschiebung in der 3. Hauptkomponente (EOF3), ein Einfluss auf die Klassifikation ist jedoch nicht festzustellen.

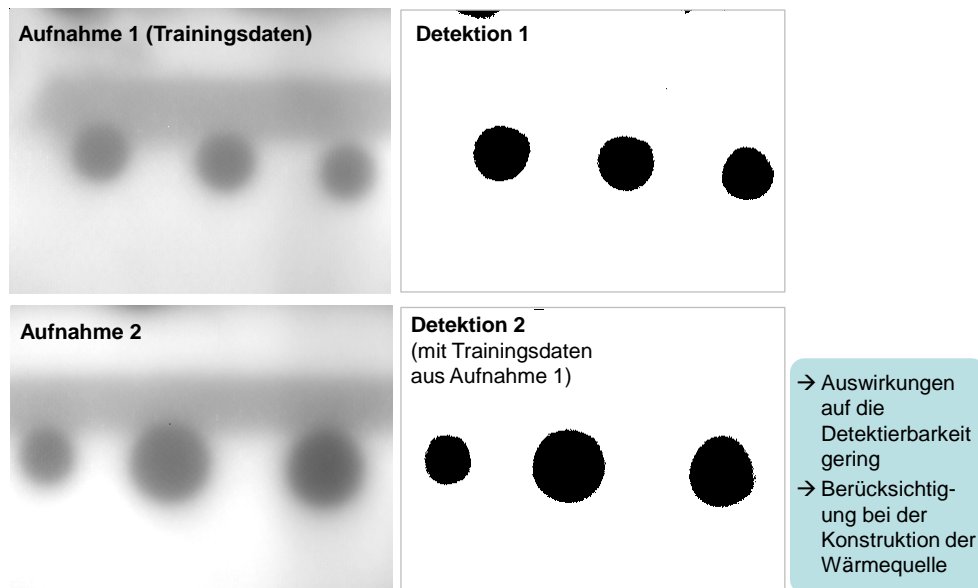


Abbildung 24: Detektierbarkeit bei Doppelbelichtungsversuchen

Es hat sich gezeigt, dass der Detektionsalgorithmus sehr robust gegenüber Doppelbelichtungen ist und damit die Detektion benachbarter Merkmale problemlos möglich ist. Sollten in der Praxis jedoch Probleme auftreten, ist es ohne weiteres möglich einen Bereich mit Doppelbelichtung in den Trainingsdaten zu integrieren.

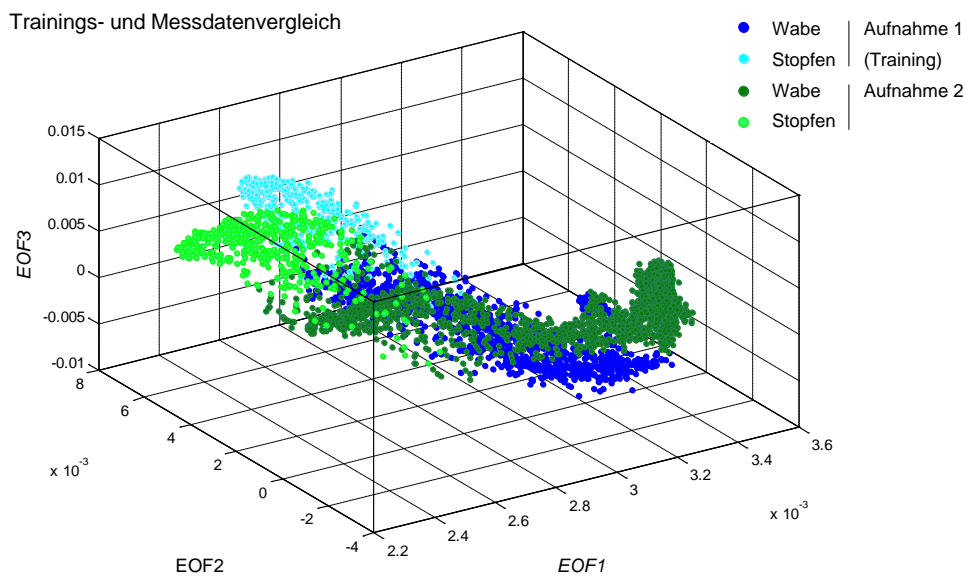


Abbildung 25: Effekt der Doppelbelichtung in den PCA-Daten

Abbildung 26 zeigt die zweite Problemstellung ‚Laminatüberlappungen‘, die für die Detektion unter industriellen Bedingungen identifiziert wurde. Schwierigkeiten sind bei der Detektion von Merkmalen in Bereichen der Masterplatten, in denen durch den Schichtprozess Laminatüberlappungen vorliegen, zu erwarten. Diese sind dadurch bedingt, dass die Halbzeuge schmäler sind als die Masterplatten und somit die Prepreg überlappend geschichtet werden.

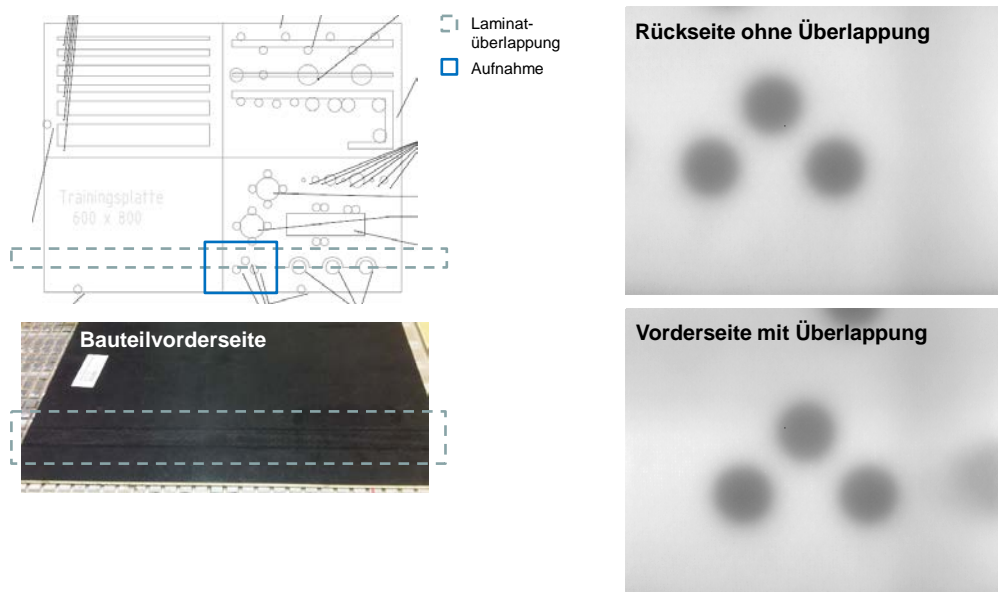


Abbildung 26: Problemstellung Laminatüberlappung

Zu Problemen bei der Detektion kann es führen, wenn das zu detektierende Merkmal im Bereich der Überlappung liegt. Diese ist aus CAD-Daten nicht zu ersehen und damit bei der Messstrategie nicht zu berücksichtigen. Um die Auswirkungen auf die Detektion zu testen, wurde eine Kalibrationsplatte eines symmetrischen Materials verwendet, welches sich von der Vorder- und Rückseite thermisch grundsätzlich gleich verhält. Das Bild unten links in Abbildung 26 zeigt einen solchen Überlappungsbereich auf der Bauteilvorderseite der Kalibrationsplatte. Zur Bewertung des Einflusses wurde derselbe Ausschnitt von Vorder- und Rückseite thermographiert. Abbildung 27 stellt die dabei erzielten Ergebnisse dar.

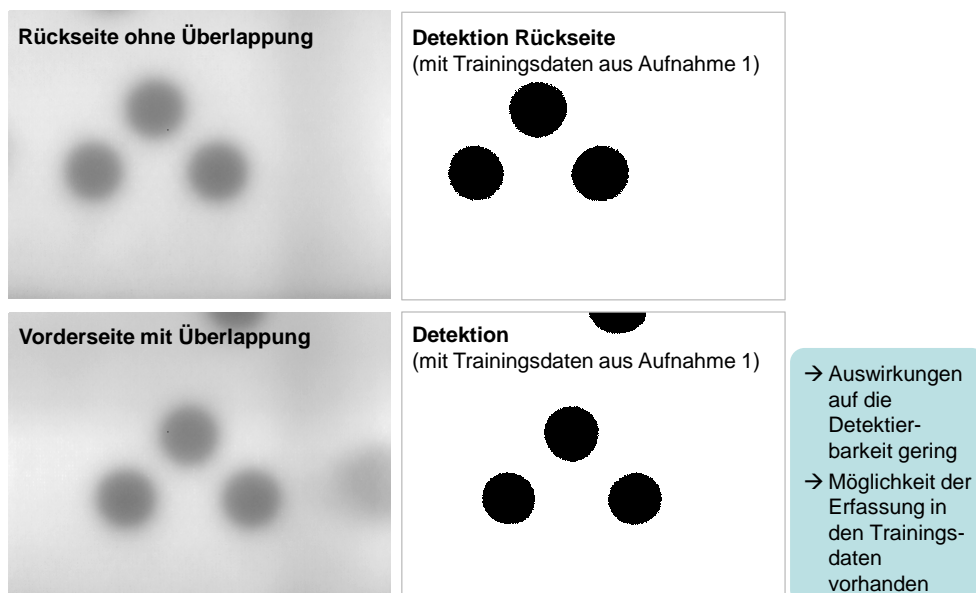


Abbildung 27: Ergebnisse der Versuche zur Laminatüberlappung

Es ist zu erkennen, dass die doppelte Decklagenschicht einen Einfluss auf die Erwärmung der Bauteiloberfläche hat. Dieser fällt im Vergleich zu anderen Schwankungen im Bildbereich jedoch gering aus. Zur Überprüfung der Detektierbarkeit wurden aus der Rückseite

ohne Überlappung Trainingsdaten gewonnen. Es zeigt sich auch für diesen Sonderfall, dass der Erkennungsalgorithmus robust gegenüber Schwankungen ist. Auch hier bestünde die Möglichkeit für die Praxis Laminatüberlappungen in die Trainingsdaten zu integrieren.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die identifizierten Konstellationen für mögliche Probleme in der industriellen Praxis nach aktueller Einschätzung für eine Umsetzung unkritisch sind. Insgesamt zeigt sich damit eine große Robustheit des entwickelten Verfahrens zur IR-Auswertung.

### Konturauswertung

Die letzte Komponente des in Abbildung 9 gezeigten Demonstrationsaufbaus ist die *Konturauswertung*, welche aus den Infrarotaufnahmen die entscheidenden Informationen über die geometrische Lage von Stopfen, Spachtelbahnen und Einlegeteilen gewinnt und dies an den in AP1c zu entwickelnden Korrekturalgorithmus übergibt.

Die besondere Herausforderung liegt dabei in der Komplexität der Zusammenstellung der zu erkennenden Konturen. Die Konturerkennung erhält ein geometrisch kalibriertes IR-Bild, welches mittels Bildauswertung nach unterhalb der Decklage liegendem Material segmentiert wird. Wegen der Vielzahl an gefertigten Komponenten, die in quasi beliebiger Zusammenstellung und Orientierung auf den Masterplatten/Menüs auftreten können, muss die Konturerkennung extrem leistungsfähig sein. Ein Ansatz ist es auf die verfügbaren CAD- und NC-Daten der Bauteilmenüs bzw. deren Maschinenmenüs zurückzugreifen und relevante Informationen an eine Konturerkennung zu übergeben.

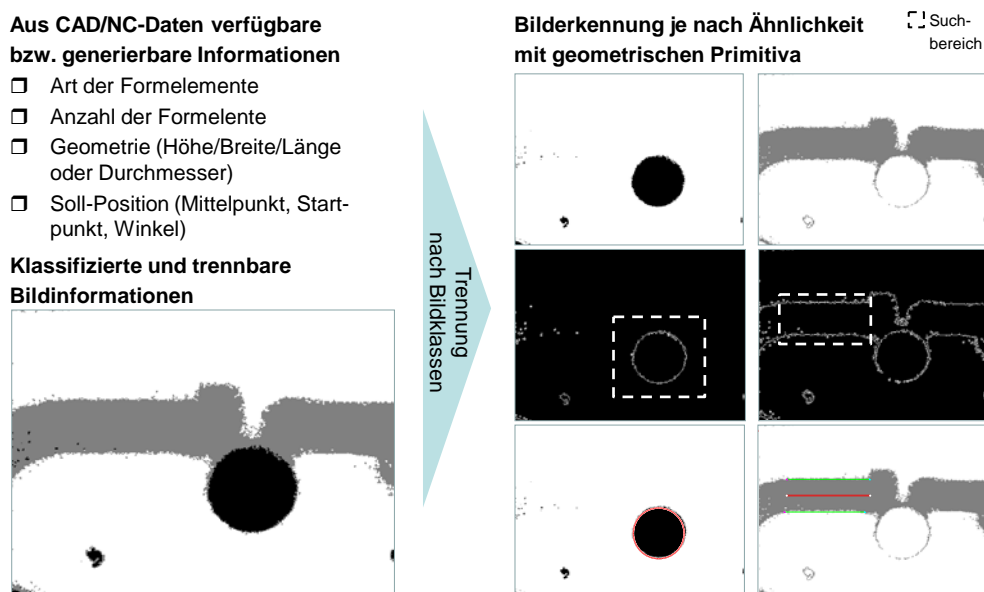


Abbildung 28: Trennung der Konturen und Rückführung auf geometrische Primitiva

Abbildung 28 zeigt an einen Beispiel das Konzept der *Konturerkennung*. Das durch die Klassifikation segmentierte Bild kann in mehrere Bilder getrennt werden, welche nur einzelne Elemente enthalten. In diesem Beispiel ein separates Bild für den detektierten Stopfen und eines für die detektierte Spachtelbahn. In der Bildverarbeitung erfolgt eine Binarisierung des Bildes zur *Kantenerkennung* mittels spezieller Filteralgorithmen. Wie eingangs beschrieben ist aus CAD- oder NC-Daten eine Vorabinformation über die unge-

fähre Lage der gesuchten Objekte bekannt. Diese kann genutzt werden, um den Suchbereich für geometrische Primitiva einzuschränken.

Der Abbildung 28 gezeigte Stopfen wurde beispielsweise mit einem standardmäßig verfügbaren Suchalgorithmus für Kreise detektiert. Spachtelbahnen können durch die Detektion von zwei Geraden gesucht und durch eine Symmetrielinie in der Mitte angenähert werden.

Im Arbeitspakt AP1b wurde ein Konzept für ein Prüfverfahren zur Untersuchung von intransparenten Faserverbund-Sandwichbauteilen entworfen und in einem Demonstrationsaufbau experimentell abgesichert sowie auf Praxistauglichkeit überprüft. Die durchgeführte Verfahrensbewertung identifizierte die Thermographie als überlegen zur Ultraschalluntersuchung. Im Rahmen des Unterarbeitspaktes zur IR-Aufnahme wurden die Möglichkeiten zur Präzisionskalibration zusammengefasst und anhand des Demonstrationsaufbaus für das Gesamtsystem experimentell erfolgreich umgesetzt. Die IR-Auswertung wurde durch die Kombination der Principal-Component-Thermographie mit einem geeigneten Klassifikationsalgorithmus umgesetzt. Die praxisnahen Tests zeigen eine hohe Robustheit des Verfahrens. Das Konzept zur Konturauswertung, welches abgestimmt auf die in AP1a festgelegte Messaufgabe entwickelt wurde, zielt auf eine Trennung der Erkennung nach den segmentierten Bildbereichen für eine Rückführung auf graphische Primitiva.

#### **6.2.1.3 AP1c – Korrektur NC-Umgebung**

Das Arbeitspaket 1c zur Korrektur NC-Umgebung war nicht Bestandteil des geförderten Vorhaben und wurde bilateral zwischen EFW und IPMT berichtet.

#### **6.2.1.4 AP1d – Archivierung, Dokumentation und QS**

Das Arbeitspaket 1d zur Archivierung, Dokumentation und QS war nicht Bestandteil des geförderten Vorhaben und wurde bilateral zwischen EFW und IPMT berichtet.

Das Arbeitspaket AP1 – Automatisierte Bauteilvermessung wurde im Rahmen der gesetzten Projektziele und den abgeleiteten Implementierungsaufgaben seitens des IPMT erfolgreich abgeschlossen.

## 6.2.2 AP2 – Maschine

### 6.2.2.1 Beratende Unterstützung

Das Arbeitspaket 2 zur Entwicklung eines Technologiedemonstrators wurde seitens des IPMT beratend unterstützt und nicht separat berichtet. Zu diesem Arbeitspaket sind entsprechende Erkenntnisse in den Berichten der Projektpartner Hamuel Reichenbacher und Elbe Flugzeugwerke enthalten.

Aufgrund der Erkenntnisse am IPMT zum Trennen von Faserverbundmaterialien mittels Schleif- bzw. Trennscheiben wurden im Arbeitspaket zur Prozessentwicklung Untersuchungen zum teilweisen und vollständigen Trennschleifen von Sandwichbauteilen gemacht. In folgendem Abschnitt werden daher Überlegungen und Erkenntnisse aus dem Trennschleifkonzept vorgestellt.

### 6.2.2.2 Trennschleifen oder Sägen als Verfahrensergänzung zum Fräsen

Die Idee des Trennschleifens wird verfolgt, um lange gerade Schnittkanten wie sie in Sandwichplatten mit großen Bauteilen vorkommen, mit noch höheren Vorschüben und geringerem Werkzeugverschleiß zu bearbeiten und somit noch wirtschaftlicher zu fertigen. Untersuchungen an CFK haben gezeigt, dass dieses möglich ist, weil die Eingriffsverhältnisse an einer Schleifscheibe thermisch deutlich günstiger sind.

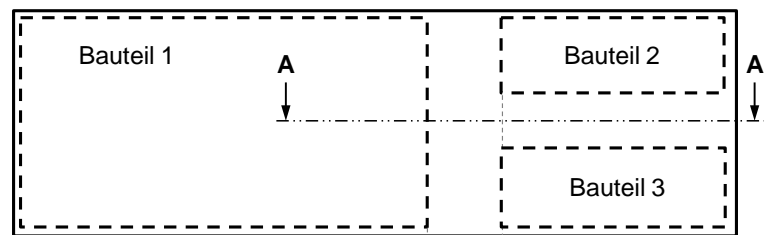
Eine Option des Trennschleif-Konzepts sieht vor ausschließlich die Decklage mit einer diamantbesetzten Trennscheibe zu entfernen. Wenn dieses nach dem Umspannen auch an der zweiten Seite geschehen ist, kann mit einem Schaftfräser der verbleibende Verbund aus Wabe und Kernfüllmasse mit sehr hohen Vorschubgeschwindigkeiten entfernt werden. Der große Vorteil liegt dabei in der hohen Standzeit der Trennschleifscheibe, die den abrasiveren Teil des Sandwichverbunds trennt. Die Standzeiten der Schaftfräser sind so um einige Größenordnungen besser.

Im Folgenden sollen nun einige notwendige Überlegungen zu diesem Verfahrenskonzept vorgestellt werden.

Abbildung 29 zeigt die Eingriffsverhältnisse beim Schnitt in der Decklage zwischen zwei Bauteilen in der Sandwichplatte. Als kritisch hinsichtlich der geometrischen Anordnung wurden T-Stöße, die durch drei Bauteile entstehen identifiziert. Damit beim Trennen der Decklage kein anderes Bauteil beschädigt wird, sind die Bauteile mit einem Mindestabstand  $y_{\text{Nut}}$  („Vorlauf“) anzuordnen. Der Mindestabstand ist Abhängig vom Trennscheibendurchmesser, Arbeitseingriff sowie von der Schwankung der Sandwichplattendicke.

**Situation**

- Bauteile auf dem Menü befinden sich im **T-Stoß**
- Decklagen werden mittels **Schleifen** entfernt
- Menüdicke schwankt um  $\Delta a_p$  innerhalb einer Toleranz

**Geometriebeziehungen**

- Schnittlänge, allgemein:

$$y_i = \sqrt{R^2 - (R - a_{pi})^2}$$

- Minimale Nutbreite (Fräser):

$$y_{Nut} = (y_{max} - y_{min}) + \Delta y$$

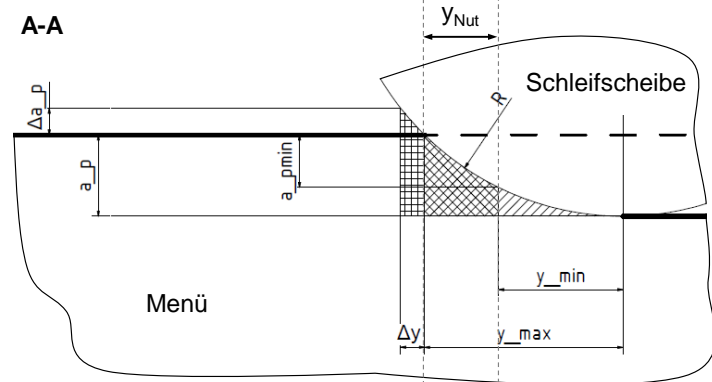


Abbildung 29: Geometrie des Eingriffs beim Trennschleifen der Decklage

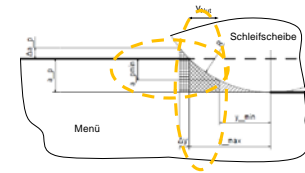
Treten nun im Bereich des ‚Vorlaufens‘ Schwankungen in der Dicke des Sandwichbauteils auf, kann es trotz ausreichend breiter Nut zu ungewollten Bauteilschädigungen kommen. Der untere rechte Teil der Abbildung 29 zeigt genau diesen Effekt. Mittels der geometrischen Beziehungen konnte ein Modell erstellt werden, das die notwendige Nutbreite je nach Eingriffsverhältnissen (Schnitttiefe, Scheibendurchmesser ...) ermittelt. Die Ergebnisse sind beispielhaft in Abbildung 30 visualisiert. Dabei ist eine minimal erforderliche Schnitttiefe zum Trennen der Decklage von  $a_{p,min} = 0,4$  mm angenommen. Die Tabelle zeigt die Auswertung für unterschiedliche Schnitttiefen, Trennscheibenradien und anzunehmende Dickenschwankungen der Decklage. Dabei wird farblich hervorgehoben, welche Parameterkombinationen bei einer Nutbreite von 4 oder 6 mm möglich oder nicht möglich sind.

Wie aus Abbildung 30 hervor geht, ist der Prozess über weite Bereiche sehr anfällig auf Schwankungen der Bauteilhöhe und diese bereits in der Größenordnung von zehntel Millimeter. Speziell für Schleifscheiben mit großen Durchmessern bei geringen Eingriffstiefen ist dies der Fall.

Notwendige Nutbreite  $y_{Nut}$   
in mm

$$y_{Nut} = (y_{max} - y_{min}) + \Delta y$$

- > 6 mm
- 4 - 6 mm
- < 4 mm
- $a_{p,min}$  nicht erfüllt



Schnitttiefe $a_p$ (mm)	Radius der Schleifscheibe R (mm)								Radius der Schleifscheibe R (mm)							
	30	40	50	60	70	80	90	100	30	40	50	60	70	80	90	100
	Dickenschwankung $\Delta a_p = 0,1$ mm								Dickenschwankung $\Delta a_p = 0,2$ mm							
0,1	3,5	4,0	4,5	4,9	5,3	5,7	6,0	6,3	4,2	4,9	5,5	6,0	6,5	6,9	7,3	7,7
0,2	4,2	4,9	5,5	6,0	6,5	6,9	7,3	7,7	4,9	5,6	6,3	6,9	7,5	8,0	8,5	8,9
0,3	4,9	5,6	6,3	6,9	7,5	8,0	8,5	8,9	5,5	6,3	7,1	7,7	8,4	8,9	9,5	10,0
0,4	5,5	6,3	7,1	7,7	8,4	8,9	9,5	10,0	6,0	6,9	7,7	8,5	9,1	9,8	10,4	10,9
0,5	3,5	4,1	4,6	5,0	5,4	5,8	6,1	6,5	4,0	4,6	5,2	5,7	6,1	6,6	7,0	7,3
0,6	3,0	3,5	3,9	4,2	4,6	4,9	5,2	5,5	3,4	4,0	4,4	4,9	5,3	5,6	6,0	6,3
0,7	2,6	3,1	3,4	3,8	4,1	4,4	4,6	4,9	3,1	3,5	4,0	4,4	4,7	5,0	5,4	5,6
0,8	2,4	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0	4,2	4,5	2,8	3,2	3,6	4,0	4,3	4,6	4,9	5,2
0,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,4	3,7	3,9	4,1	2,6	3,0	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6	4,8
1,0	2,1	2,4	2,7	3,0	3,2	3,4	3,7	3,9	2,4	2,8	3,2	3,5	3,8	4,0	4,3	4,5
1,1	2,0	2,3	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	2,3	2,7	3,0	3,3	3,6	3,8	4,0	4,3
1,2	1,9	2,2	2,4	2,7	2,9	3,1	3,3	3,4	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,6	3,8	4,1
1,3	1,8	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	2,1	2,4	2,7	3,0	3,2	3,5	3,7	3,9
1,4	1,7	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,1	2,0	2,3	2,6	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7
1,5	1,6	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,0	1,9	2,2	2,5	2,7	3,0	3,2	3,4	3,6
1,6	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	2,9	1,8	2,1	2,4	2,6	2,9	3,1	3,3	3,4
1,7	1,5	1,7	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,8	1,8	2,1	2,3	2,6	2,8	3,0	3,2	3,3
1,8	1,4	1,7	1,9	2,1	2,3	2,4	2,6	2,7	1,7	2,0	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2
1,9	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,6	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,1
2,0	1,4	1,6	1,8	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	1,6	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,0

Abbildung 30: Auswertung  $y_{Nut}$  für  $a_{p,min} = 0,4$  mm

Um ein besseres Verständnis für das Auftreten von Dickenschwankung zu bekommen, ist im Folgenden eine Liste mit denkbaren Quellen von Schwankungen aufgeführt. Die Schwankungen setzen sich aus mehreren Anteilen zusammen:

- **Welligkeit** der Bauteile bedingt durch die Anbindungsunterschiede am Wabensteg oder Wabenmitte
- **Dickentoleranz** durch Schwankung der Waben und Laminatschichten
  - Zwischen Sandwichplatten
    - Dickenschwankung der Waben- und Laminatchargen (meist kompensierbar)
    - Pressprozesseinflüsse (schwer kompensierbar)
  - Innerhalb einer Sandwichplatte
    - Linear (kompensierbar)
      - Schiefer Wabenzuschnitt vor Expansion
    - Nicht-linear (schwer kompensierbar)
      - Überlappung Lamine
      - Kernfüllmasse
      - Pressprozesseinflüsse

Nach der theoretischen Analyse wurden am IPMT Stichversuche zur Quantifizierung der übergeordneten Effekte durchgeführt.



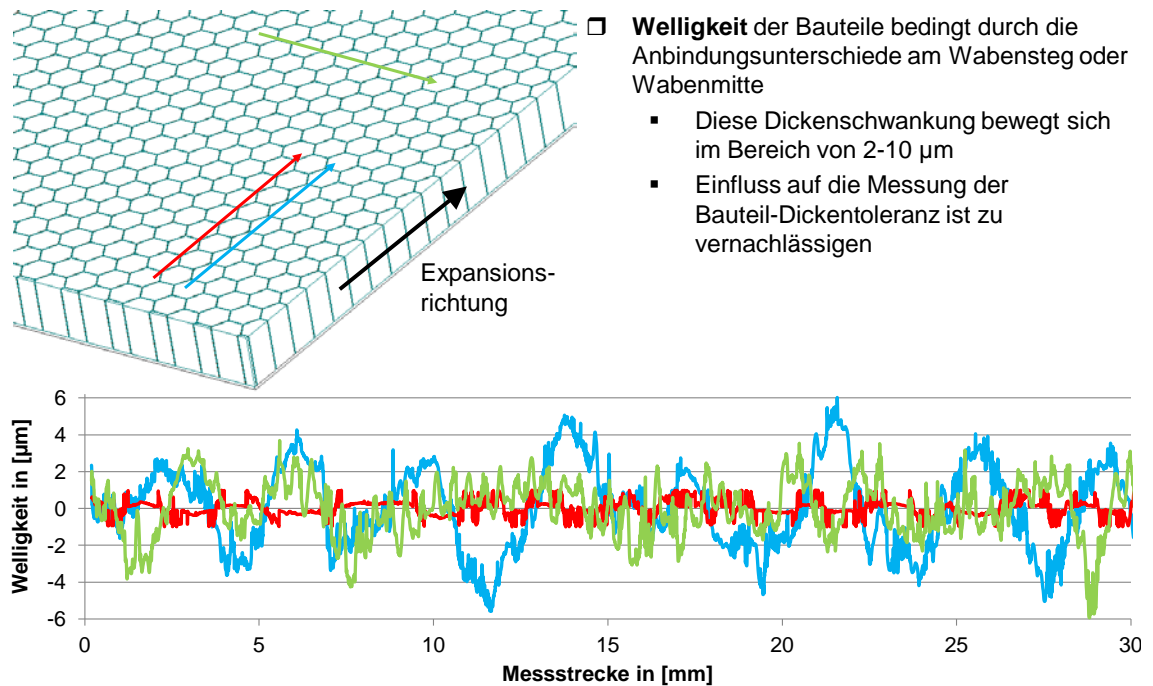


Abbildung 31: Messung der Welligkeit von Sandwichbauteilen

Die Ergebnisse der Welligkeitsuntersuchung sind in Abbildung 31 dargestellt. Es handelt sich dabei um taktile Messungen. Die Messungen wurden jeweils über eine Messstrecke von 30 mm aufgezeichnet und in unterschiedlichen Richtungen sowie versetzt zur Wabenstruktur durchgeführt. Die maximale Schwankung durch Welligkeit liegt bei ca. 10  $\mu\text{m}$  und ist daher nicht als prozesskritisch anzusehen.

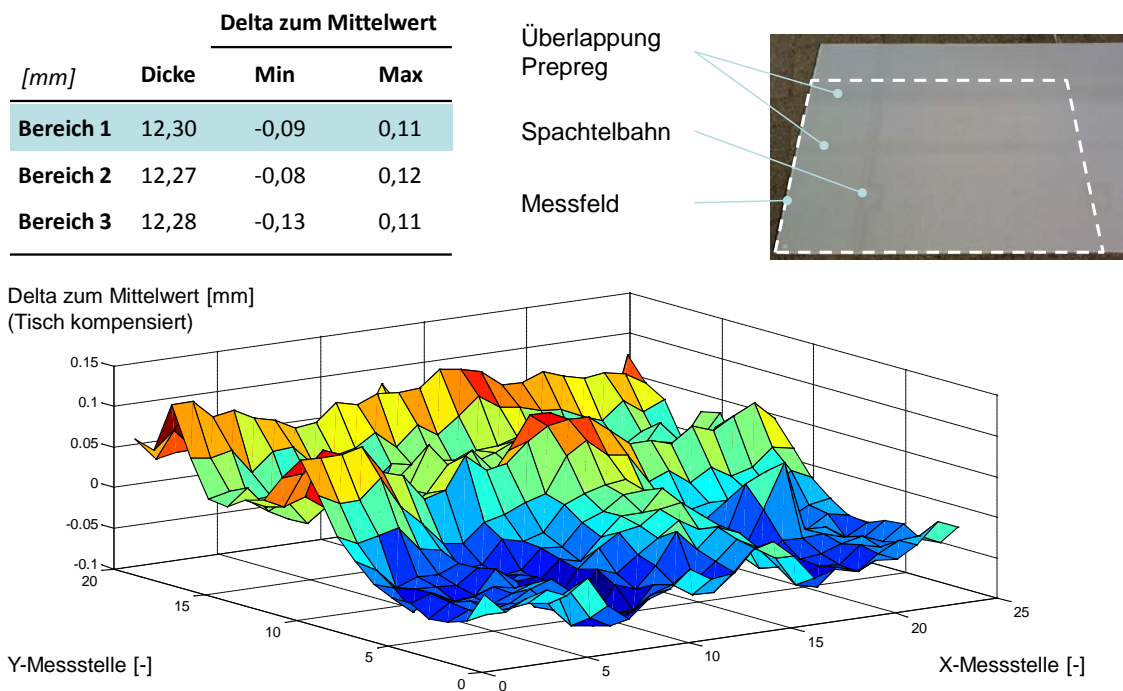


Abbildung 32: Dickentoleranzen von gepressten Sandwichplatten

Nachdem die Welligkeit als Quelle für Prozessfehler ausgeschlossen werden konnte, galt es den möglichen Einfluss von Dickenschwankungen der Sandwichplatten zu ermitteln. In

den vorliegenden Messungen wurde dabei nur auf die Schwankungen innerhalb einer Sandwichplatte eingegangen, da Schwankungen zwischen Sandwichplatten durch eine Höhenmessung vor dem Fräsprozess einfach kompensiert werden können.

In Abbildung 32 ist die flächige Darstellung der Höhenmessergebnisse gezeigt. Dazu wurde mit einem festen Punktraster die Tischhöhe der Reichenbacher Vision 5-Achs-CNC Maschine mit einem elektronischen 3D-Messtaster erfasst. Im Anschluss wurden auf diesem Tisch drei Sandwichplatten mit derselben Methode vermessen. Vom Ergebnis wird jeweils die Höhe des Tisches an der selben Stelle abgezogen, um die Nettosandwichplattendicke ohne Schwankungen der Tischhöhe zu ermitteln.

Durch den Vergleich mit der fotografischen Aufnahme der Sandwichplatte in der oberen rechten Hälfte der Abbildung 32 zeigt sich, dass Effekte wie Laminatüberlappung durch eine Höhenmessung gut erfasst werden. Für die drei Bereiche des vermessenen Sandwichplatte ergeben sich ähnliche minimale und maximale Abweichungen der Bauteildicke vom Mittelwert. Diese liegen in der Größenordnung von zehntel Millimetern und sind damit im oben aufgeführten Kinematikmodell (Abbildung 29) erfasst. Deutliche höhere Schwankungen, aber kompensierbar, sind nach Erfahrung von EFW zwischen den Sandwichplatten zu erwarten.

### 6.2.3 AP3 – Prozessentwicklung

Im Arbeitspaket *Prozessentwicklung* (AP 3) wurde der gesamte Zerspanprozess betrachtet, um die gesetzten Kernziele zu erreichen. Im Rahmen dieses Arbeitspakets verantwortet das IPMT die Unterarbeitspakete Prozessauslegung mechanische Bearbeitung, Prozesssimulation (AP 3a), Absaugung/Kühlung (AP 3b) und Prozessüberwachung (AP 3d). Um den Fertigungs- und Bearbeitungsprozess grundsätzlich einschätzen zu können, wurde mit einer Ist-Analyse begonnen, mit dem Ziel die Zusammenhänge zwischen Bearbeitungstemperatur, Zerspankräften und Spanabfuhr zu charakterisieren.

Im Fertigungsprozess vor Projektbeginn werden die Sandwichplatten mittels Vakuumspannung auf der Maschine gespannt. Das geschieht durch Ansaugen der Sandwichplatten durch einen Spanntisch hindurch, welcher aus mitteldichter Faserplatte (MDF) besteht. Die spanende Bearbeitung geschieht auf voller Sandwichplattendicke und zusätzlich mit einem Aufmaß von ungefähr 0,3 mm im Spanntisch. Das Aufmaß ist nötig um die unten liegende Plattenseiten zu durchtrennen. Durch das Aufmaß verschleißt der Spanntisch und muss in regelmäßigen Abständen plangefräst werden um die ursprünglichen Spannbedingungen herzustellen. Sobald die Mindestdicke des Spanntischs (der MDF-Platte) erreicht ist wird er erneuert. Die spanende Bearbeitung der Sandwichplatten wird aus diesem Grund im entwickelten Maschinenkonzept von beiden Plattenseiten geschehen. Die Sandwichplatten werden auf halber Plattendicke spanend bearbeitet und anschließend gewendet. Auf einen verschleißenden Vakuumspanntisch kann verzichtet werden und die Spannbedingungen konstant gehalten werden. Die Produktivität des Zerspanprozesses muss zum Erreichung der Projektziels mindestens der Produktivität vor Projektbeginn entsprechen. Die Produktivität ist bei der spanenden Bearbeitung durch die Vorschubgeschwindigkeit bestimmt, wenn der Zahnvorschub beibehalten wird. Bei einer Zweiseitenbearbeitung muss die Vorschubgeschwindigkeit verdoppelt werden. In allen Untersuchungen wurde die Vorschubgeschwindigkeit mit dem Zweifachen, des vor Projektbeginn etablierten Wertes, angenommen und der Prozess daraufhin ausgelegt.

#### 6.2.3.1 AP3a – Prozessauslegung mech. Bearbeitung, Prozesssimulation

Das Arbeitspaket Prozessauslegung mech. Bearbeitung, Prozesssimulation beschäftigte sich mit der Analyse, Auslegung und Simulation des Bearbeitungsprozess von Sandwichplatten. Begonnen wurde mit einer Ist-Analyse des Bearbeitungsprozesses und dem systematischen Auslegen der benötigten Bearbeitungsprozesse. Untermauert wurden die erzielten Ergebnisse durch begleitende Simulationen der betrachteten Bearbeitungsprozesse.

##### 6.2.3.1.1 AP3a1 – Analyse

Dieses Arbeitspaket diente der Analyse des vorliegenden Bearbeitungsprozesses. Der Fokus lag dabei auf der Zusammenstellung von Material-, Formelement- und Prozesskombinationen bzw. Arbeitsschritten die kritisch sind in Bezug auf:

- Bauteilqualität,
- Produktivität und
- Wirtschaftlichkeit

waren. Es wurde dazu eine Ist-Aufnahme vor Ort vorgenommen um diese kritischen Arbeitsschritte zu identifizieren und eine Übersicht über die Kombinationen der Materialien,

Formelemente und Prozesse zu bekommen. Materialkombinationen sind dabei durch die unterschiedlichen Fertigbauteile festgelegt, die je nach Anforderung Unterschiede aufweisen. Die Unterschiede liegen in:

- Decklagenart (CFK/GFK)
- Decklagendicke
- Decklagenaufbau (Gelege/Gewebe)
- Wabendicke
- Wabengröße (Maschenweite)
- Tränkung der Wabe
- Kernfüllmasse (weiße/rote)
- Material der Einlegeteile (GFK-Art)

In jedem Fall ist jedoch die oberste und unterste Lage aus GFK zum Schutz vor Umwelteinflüssen. Jedes Bauteil hat im späteren Einbauzustand eine Funktion. Deshalb haben die Bauteile verschiedene Kantenformen, Fasen, Taschen, Bohrungen und Senkungen. Dem entsprechend unterscheiden sich auch die zum Einsatz kommenden Prozesskombinationen:

- Besäumen
- Vollbohren
- Aufbohren
- Senken

Aus diesen genannten Kombinationsmöglichkeiten entstehen verschiedenste Arbeitsschritte die kritisch für die genannten Kriterien sein können. Die Produktivität ist nach (Wöhe & Döring, 2005) definiert als:

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Ausbringungsmenge}}{\text{Einsatzmenge}} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}}$$

Sowie die Wirtschaftlichkeit als:

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Ertrag}}{\text{Aufwand}}$$

Im vorliegenden Fall ist die Produktivität gleich der Wirtschaftlichkeit da die Wirtschaftlichkeit nicht in Bezug auf monetären Ertrag bzw. Aufwand untersucht werden soll. Als kritisch hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Produktivität wurden folgende Probleme erkannt:

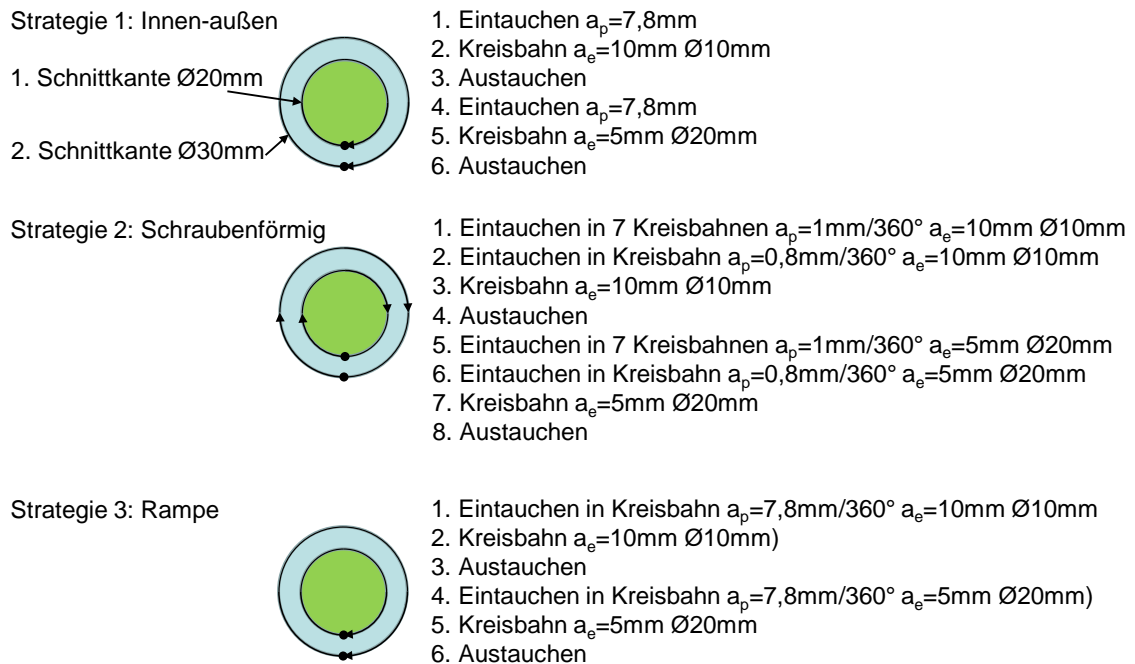
- Verzug der Sandwichplatten während des Pressens kann bei unzureichend genauer Einmessung zu Ausschuss führen
- Späne verbleiben in der Nut bis zur Entgrat- bzw. Montagestation und erfordern eine manuelle Nacharbeit
- Fräsen von Taschen, Bohrungen und Senkungen in GFK-Einlegeteile erfordert vergleichsweise viel Zeit im Gegensatz zum Fräsen von Bauteilkanten
- Teure Werkzeuge mit Spanbrechern nötig, welche die Spanabfuhr verbessern sollen
- Sandwichplatten mit  $t > 12$  mm werden zur besseren Spanabfuhr in zwei Zustellungen gefräst

Kritisch hinsichtlich der Bauteilqualität ist:

- Verkleben der Späne in der gefrästen Nut
- Delamination (Delamination > 1mm) und Faserüberstände (Hintze, Hartmann, & Schütte, 2011)
- Thermische Schädigung des GFKs beim Taschenfräsen

### 6.2.3.1.2 AP3a2 – Zerspanungsuntersuchungen an kritischen Materialkombinationen

Das Fräsen von Taschen, Bohrungen und anderen Geometrielementen in GFK-Einlegeteile ist ein kritischer Prozess. Aufgrund der hohen Zerspanntemperaturen ist nur eine sehr geringe Vorschubgeschwindigkeit möglich. Hierbei kann es zur thermischen Schädigung des GFKs und in Einzelfällen sogar zu einer exothermen Reaktion kommen. Deshalb wurde das Fräsen einer kreisförmigen Tasche mit einem Durchmesser von 30 mm in GFK-Vollmaterial untersucht. Dabei wurde die Schneidentemperatur am Werkzeug unmittelbar nach Ende des Prozesses bei verschiedenen Bearbeitungsstrategien ermittelt. Die einzelnen Bearbeitungsstrategien sind Abbildung 33 gezeigt.



MQS15\_5064

Abbildung 33: Bearbeitungsstrategien beim Taschenfräsen von GFK-Vollmaterial

Bei Strategie 1 taucht das Werkzeug ( $d = 10\text{ mm}$ ) im Zentrum des Kreises bis auf Tiefe von 7,8 mm ein und in zwei radialen Zustellungen wird die Tasche zirkulargefräst. Bei Strategie 2 wird ebenfalls mit zwei radialen Zustellungen gefräst, jedoch wird bei der axialen Zustellung schraubenförmig (jeweils 9 Windungen) auf Endtiefe eingetaucht. Strategie 3 ist Strategie 2 sehr ähnlich, da die axiale Zustellung ebenfalls zeitparallel zur Kreisbewegung stattfindet, allerdings rampenförmig auf Endtiefe während einer Kreisbewegung. Abbildung 34 zeigt die Werkzeugschneidentemperaturen bei den verschiedenen Strategien und Bearbeitungsparametern. Die Bearbeitungsparameter wurden jeweils in Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit variiert und zwei Werkzeuge mit unterschiedlichen Werkzeugrückspanwinkeln ( $\gamma_p = -19^\circ$  und  $23^\circ$ ) verwendet. Bei Strategie 1 und 3 liegt ein

wesentlich höheres Zeitspanvolumen im Vergleich zu Strategie 2 vor. Es zeigte sich, dass beim Fräsen mit geringem Zeitspanvolumen (Strategie 2) und identischen Bearbeitungsparametern, die Werkzeugschneidentemperatur und somit die thermische Schädigung am geringsten ist. Jedoch führt ein geringes Zeitspanvolumen zu einer Erhöhung der Hauptzeit  $t_h$ .

GFK-Material mit Dicke 8,8 mm, Fräser aus TiN-beschichtetem Hartmetall,  $d_{\text{Fräser}} = 10 \text{ mm}$ ,  $z = 5$

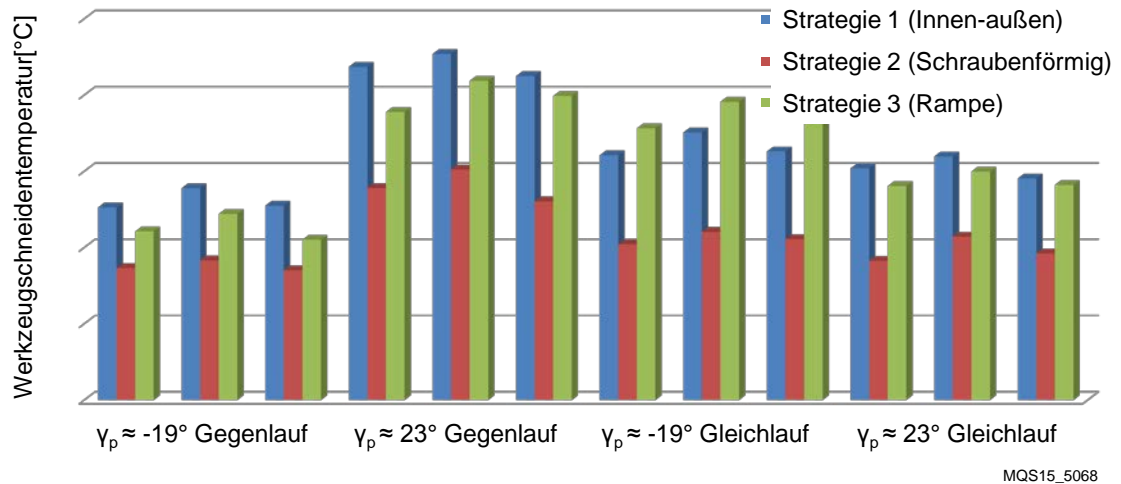


Abbildung 34: Werkzeugschneidentemperaturen bei verschiedenen Bearbeitungsstrategien und -parametern

Es war zu klären, ob die höheren Werkzeugschneidentemperaturen bei hohem Zeitspanvolumen (Strategie 1 und 3) durch ein unterschiedliches Schnittmoment oder durch Unterschiede in der Spanabfuhr bedingt sind. Um diesen Sachverhalt zu klären, wurde das Schnittmoment sowohl bei guter als auch schlechter Spanabfuhr prozessparallel gemessen. Die Spanabfuhr wurde durch Verwendung einer Druckluftdüse beeinflusst. Wird eine Druckluftdüse auf den Prozess gerichtet und die Späne direkt nach der Zerspanung vom Prozess abgeführt, resultiert das in einer guten Spanabfuhr. Schaltet man die Druckluftdüse während des Prozesses und der Schnittmomentmessung aus, so liegt eine schlechte Spanabfuhr vor. Die Schnittmomente unterscheiden sich nur geringfügig, wodurch gezeigt wird, dass die Spanabfuhr maßgeblich die Werkzeugschneidentemperatur beeinflusst.

Strategie 2 stellte sich als vorteilhaft hinsichtlich der auftretenden Werkzeugschneidentemperatur heraus, jedoch ist die Hauptzeit zum Fräsen einer Tasche mit dieser Strategie rund zehn Mal länger. Im Fortgang des Projektes wurde untersucht, durch welche Maßnahmen dieser Nachteil verhindert werden kann.

### 6.2.3.1.3 AP3a5 – Prozess- und Werkzeugauslegung

Die innerhalb des Projektes getroffene Entscheidung, die Sandwichplattenbearbeitung im zu entwickelnden Maschinenkonzept von beiden Plattenseiten durchzuführen bedingt, dass neue Werkzeuge und Prozessschritte ausgelegt werden müssen. Als zentrale Aufgabe stellt sich die versatzfreie beidseitige Bearbeitung der Sandwichplatten. Zuerst sind nach dem Aufspannen bzw. Wenden die Platten korrekt zu referenzieren. Es wurde dazu zunächst ein Verfahren entwickelt, wie der Einmessvorgang geschehen kann und Zerspanversuche zur anschließenden Messung der geometrischen Abweichungen durch-

geführt. Um die geometrischen Abweichungen messen zu können, wurde für die Zerspanversuche eine mitteldichte Faserplatte der Dicke 10 mm, Länge 1,2 m und Breite 0,8 m verwendet. Mitteldichte Faserplatte (MDF) ist annähernd homogen über die Dicke.

Abbildung 35 zeigt schematisch den Einmessvorgang. Es werden zunächst drei Aussparungen/Anschläge in das Bauteil gefräst. Die Verlängerung des einseitigen Anschlags befindet sich dabei in einem 90°-Winkel zum zweiseitigen Anschlag. Zum Referenzieren der Platte zur Maschine wird nun mittels eines elektronischen Messtasters an den drei Anschlängen angetastet und über trigonometrische Funktionen die Verschiebung (CTRANS) und Verdrehung (CROT) des Werkstückkoordinatensystems berechnet. Diese Kompensation des Werkstücknullpunktes kann im Bearbeitungsprogramm softwaretechnisch berücksichtigt werden. Es ist von Vorteil, wenn bei beiden Antastvorgängen (Ober- und Unterseite) auf gleicher Höhe (in z-Richtung) zum Maschinentisch angetastet wird, da so Fehler der Rechtwinkligkeit der Antastflächen zum Maschinentisch keinen Einfluss haben.

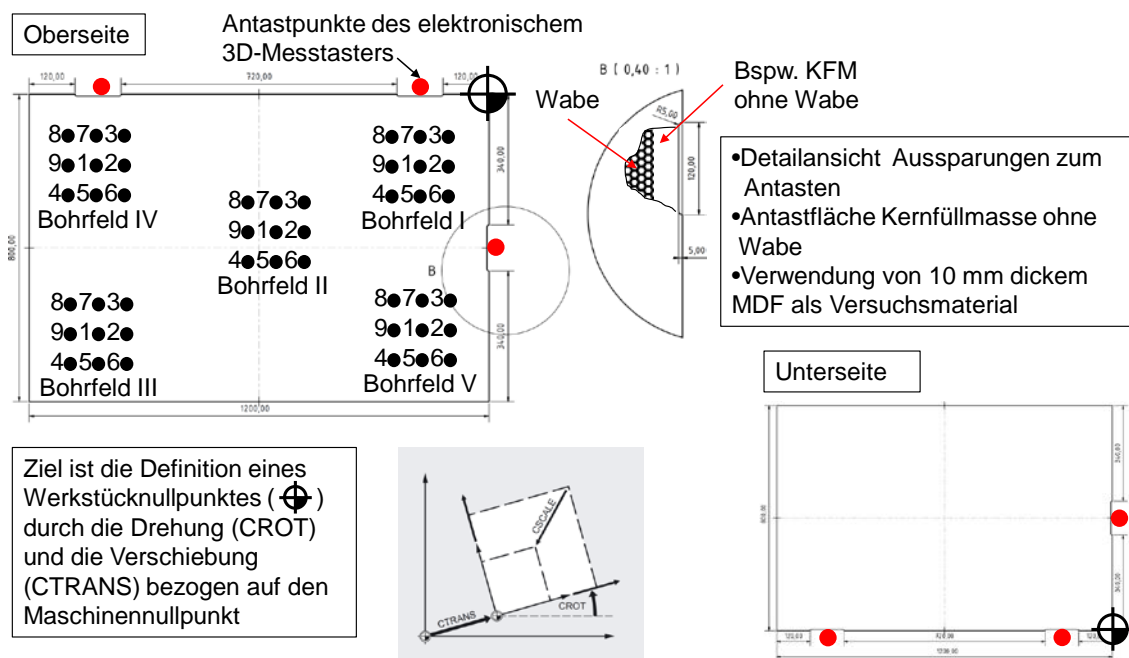


Abbildung 35: Einmessvorgang der Sandwichplatten

Die Bearbeitung der ersten Seite kann nun durchgeführt werden. Dazu wurden die in Abbildung 35 gezeigten 9 Bohrungen pro Bohrfeld bis auf halbe Plattendicke gebohrt. Anschließend wird die Platte um 180° um die lange Hochachse gedreht und der Einmessvorgang erneut durchgeführt. Nun wurden die 9 Bohrungen pro Bohrfeld erneut bis auf halbe Plattendicke gebohrt, so dass eine Durchgangsbohrung entsteht. Die Bohrungen von Ober- und Unterseite wurden zum Schluss geometrisch vermessen, um die Koaxialität zueinander zu ermitteln. Die Koaxialität der Bohrungen von Ober- und Unterseite der Bohrung 1 und 2 jedes Bohrfeldes ist in Abbildung 36 dargestellt. Die Koaxialität schwankt zwischen 29,2 und 95,9  $\mu\text{m}$ . Dies kann als ausreichend genau hinsichtlich des Versatzes akzeptiert werden. In Vorversuchen zeigte sich jedoch, dass eine homogen ebene Oberfläche der Antastfläche von entscheidender Bedeutung für die produzierbare Qualität ist. Besteht die Oberfläche einer Kante aus Wabe und Kernfüllmasse hat sie eine Wel-

ligkeit von bis zu 0,1 mm. Die Antastfläche im zu entwickelnden Maschinenkonzept muss also beispielsweise an einlamierten GFK-Teilen oder durch optische Einmessung von Referenzmarken geschehen, die nach dem Fräsen der Anschläge eine homogen ebene Oberfläche bereitstellen bzw. einwandfrei optisch einmessbar sind.

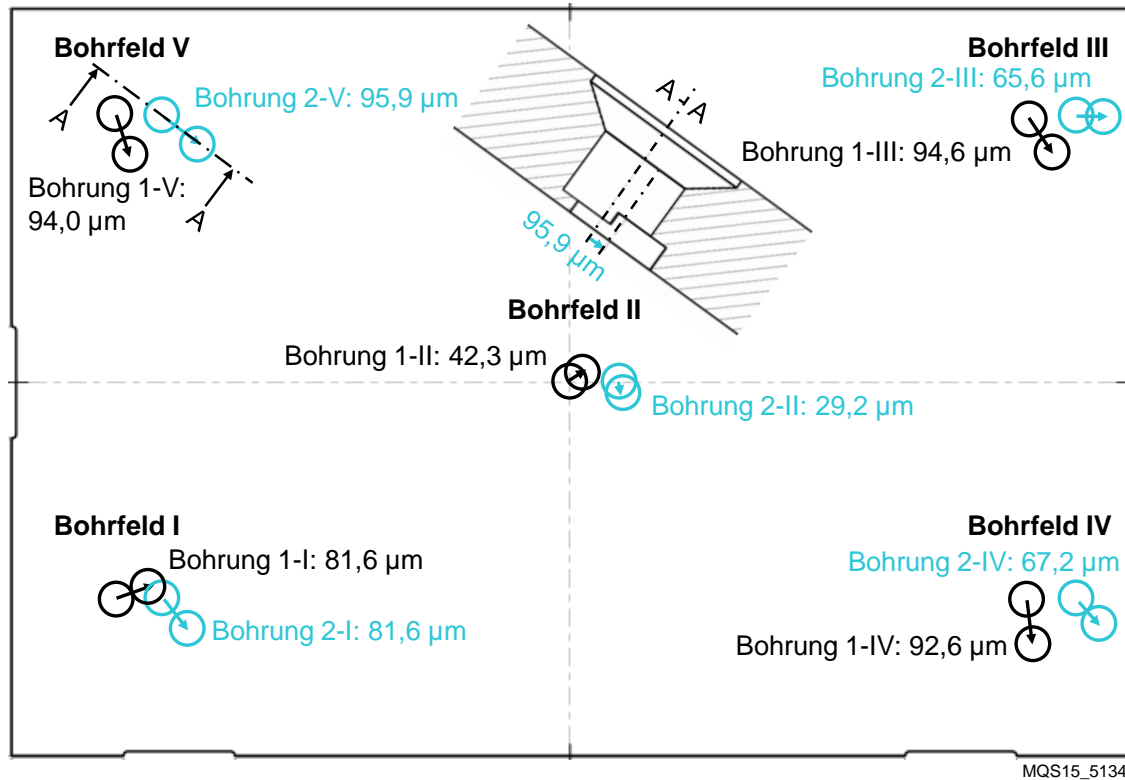


Abbildung 36: Koaxialität der Bohrung 1 und 2 von Ober und Unterseite je Bohrfeld

Mit dem Einmessvorgang ist die Grundvoraussetzung für ein Bearbeitungskonzept und Versuche zum zwischenzeitlichen Wenden der Sandwichplatte gegeben. Nachdem die Machbarkeit des Einmessvorgangs gezeigt war, konnte mit der Werkzeugentwicklung fortgefahren werden. Sie teilt sich in die Bearbeitungsaufgaben:

- Fräsen und
- Bohren und Bohrsenken

auf. Die beidseitige Bearbeitung eröffnet neue Möglichkeiten der Aufteilung der Bearbeitungsbahnen. Die Qualität kann so weiter gesteigert werden, bei gleichzeitiger Bearbeitungszeitverkürzung.

Für das beidseitige Fräsen von Sandwichplatten wurde ebenfalls ein Prozess und Werkzeug ausgelegt. In Abbildung 37 sind drei verschiedene Möglichkeiten gezeigt, wie eine beidseitige Fräsbearbeitung geschehen kann.



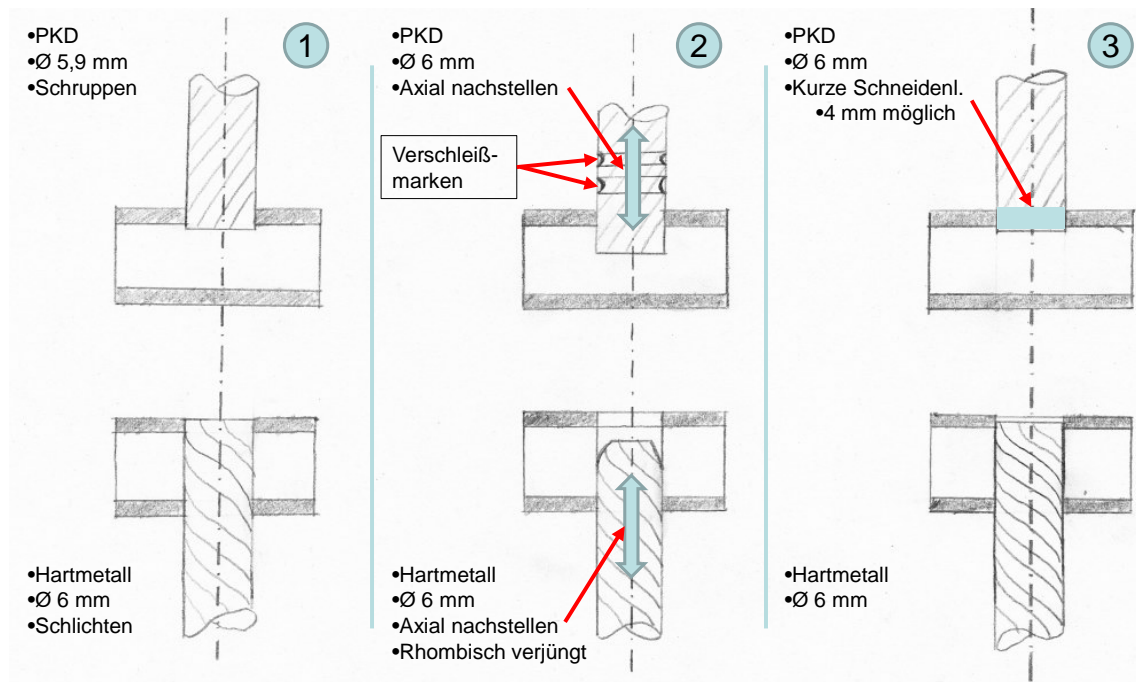
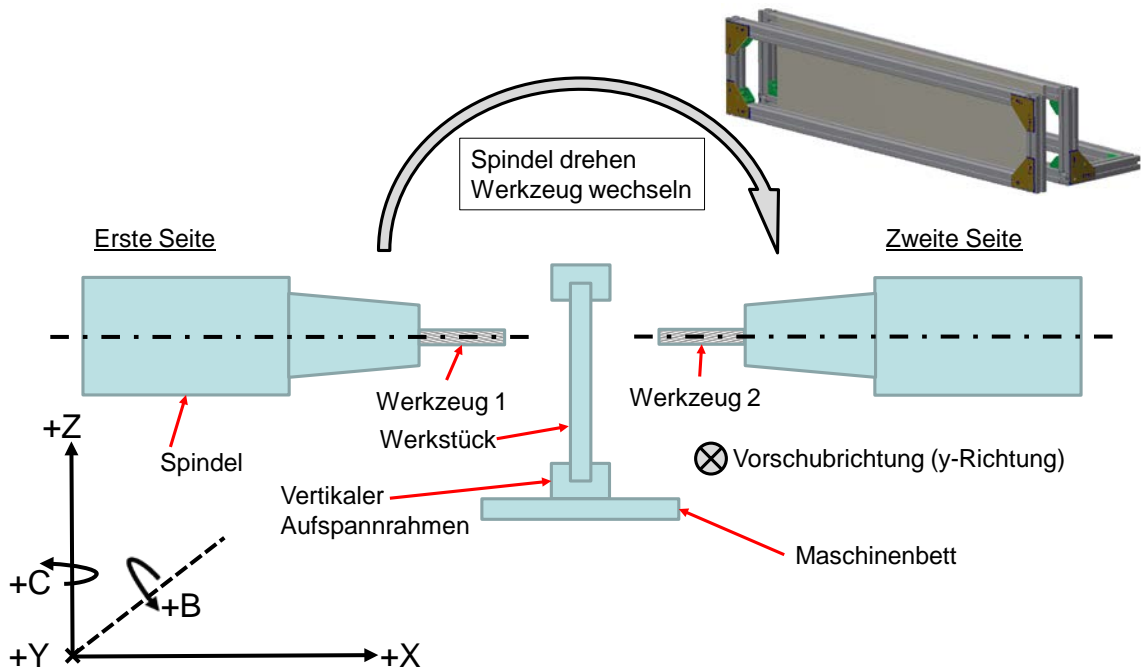


Abbildung 37: Werkzeugkonzepte zum beidseitigen Bearbeiten

Die erste Möglichkeit ist die obere Decklage mittels eines Hartmetall- oder PKD-Fräasers (bspw. Durchmesser 5,9 mm) zu bearbeiten. Bei sehr abrasiven oberen Decklagen sollte der PKD-Fräser verwendet werden. In einem zweiten Schritt wird von der gegenüberliegenden Seite mit einem im Durchmesser geringfügig größeren Hartmetallwerkzeug (bspw. Durchmesser 6 mm) die untere Decklage, Wabe, Kernfüllmasse geschruppt und die obere Decklage geschlichtet.

Eine zweite Möglichkeit ist von der Oberseite mittels eines PKD-Fräasers (bspw. Durchmesser 6 mm) je nach Verschleißzustand die Bearbeitung mit abnehmender Schnitttiefe  $a_p$  durchzuführen. Die Verschleißmarken würden mit abnehmender Schnitttiefe nach oben verschoben und die obere Decklage mit einem Schneidenteil des PKD-Fräasers bearbeitet der noch keinerlei Verschleiß durch die abrasive Decklage erfahren hat. Die Unterseitenbearbeitung wird mit einem Hartmetallwerkzeug jeweils mit zunehmender Schnitttiefe durchgeführt. Eine rhombische Verjüngung kann zu gleichmäßigen Schnittkanten im Bereich der Wabe/Kernfüllmasse führen. Die dritte, favorisierte Lösung ist in Abbildung 37 rechts gezeigt. Die abrasive Decklage wird mittels eines PKD-Fräasers mit geringer Schneidlänge bearbeitet. Von der Gegenseite wird Wabe, Kernfüllmasse und untere Decklage dann durch ein Hartmetallwerkzeug gleichen Durchmessers bearbeitet. Der PKD-Fräser kann nach Erreichen der Verschleißgrenze nur stirnseitig nachgeschliffen oder neu mit PKD-Blanks bestückt werden. Der Hartmetallfräser vollführt eine oszillierende Bewegung entlang der Werkzeugachse, um den Verschleiß durch die Decklage auf einen größeren Schneidbereich zu verteilen. In der Praxis ist es besonders wichtig, das NC-Programm so zu gestalten, dass eine Radiuskorrektur der Fräsbahn verwendet wird um eine größtmögliche Ebenheit der Bearbeitungskante zu gewährleisten.

Einen alternativen Prozess zur beidseitigen Bearbeitung stellt Abbildung 38 vor.



MQS15\_5094

Abbildung 38: Aufspannkonzept zum beidseitigen Bearbeiten

Dabei ist das Werkstück auf einen Rahmen aufgespannt und somit von beiden Seiten zugänglich. Das Konzept wurde für eine Verwendung in einem Maschinengesamtkonzept verworfen, da die Aufspannung extrem biegesteife Bauteile voraussetzt. Bei einer Sandwichplattengröße von 2 x 3 m wäre eine steife Aufspannung kaum zu realisieren.

Sind viele kleine Sandwichbauteile in eine Sandwichplatte eingebettet, so entsteht viel Verschnittvolumen durch die Fräsnut zum Ausschneiden der Sandwichbauteile. Um diesen Verschnitt zu reduzieren wurden Versuche mit kleinerem Werkzeugdurchmesser durchgeführt. Der Werkzeugdurchmesser wurde dazu von 6 auf 4 mm verkleinert. Die Werkzeuggeometrie entsprach der des 6 mm-Werkzeugs. Zum Vergleich wurden die Versuche auch mit dem Werkzeug mit Durchmesser 6 mm durchgeführt. Bewertungskriterium war der Werkzeugverschleiß in Form des Schneidkantenradius. Das Ergebnis ist in Abbildung 39 dargestellt. Bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit, Schnittgeschwindigkeit, Zahnvorschub und Vorschubweg stellt sich ein wesentlich geringerer Schneidkantenradius am Werkzeug mit 4 mm Durchmesser im Gegensatz zum Werkzeug mit 6 mm Durchmesser ein. Dies ist bedingt durch den kleineren Schnittpfad, den jede der fünf Schneiden zurückgelegt hat.

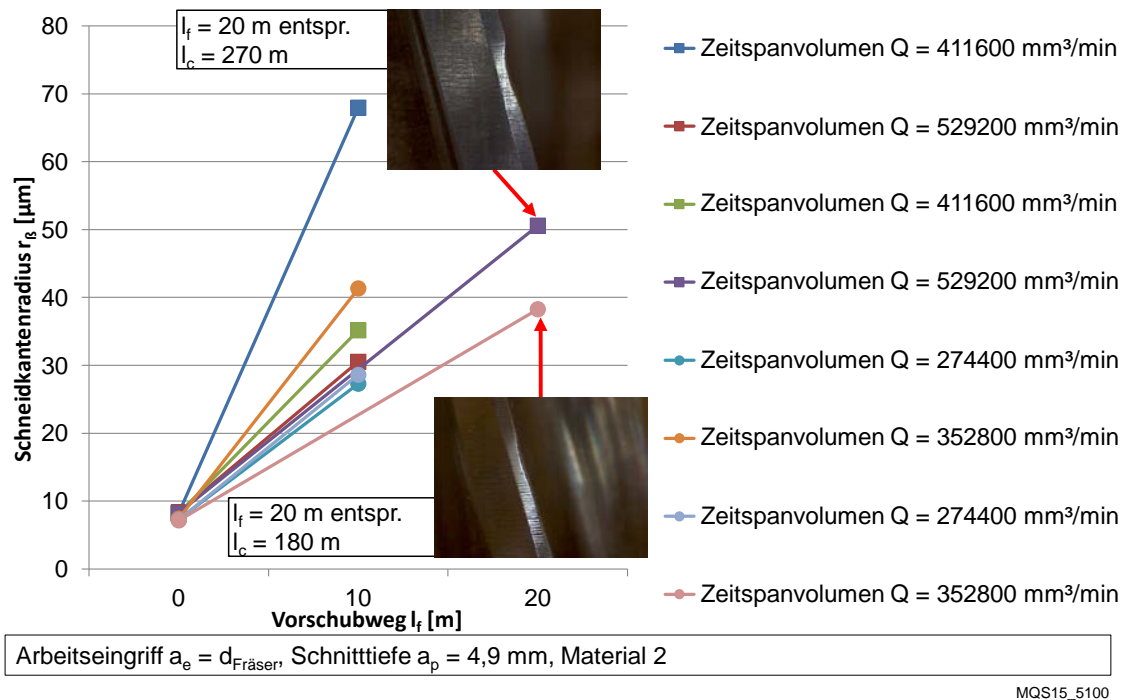
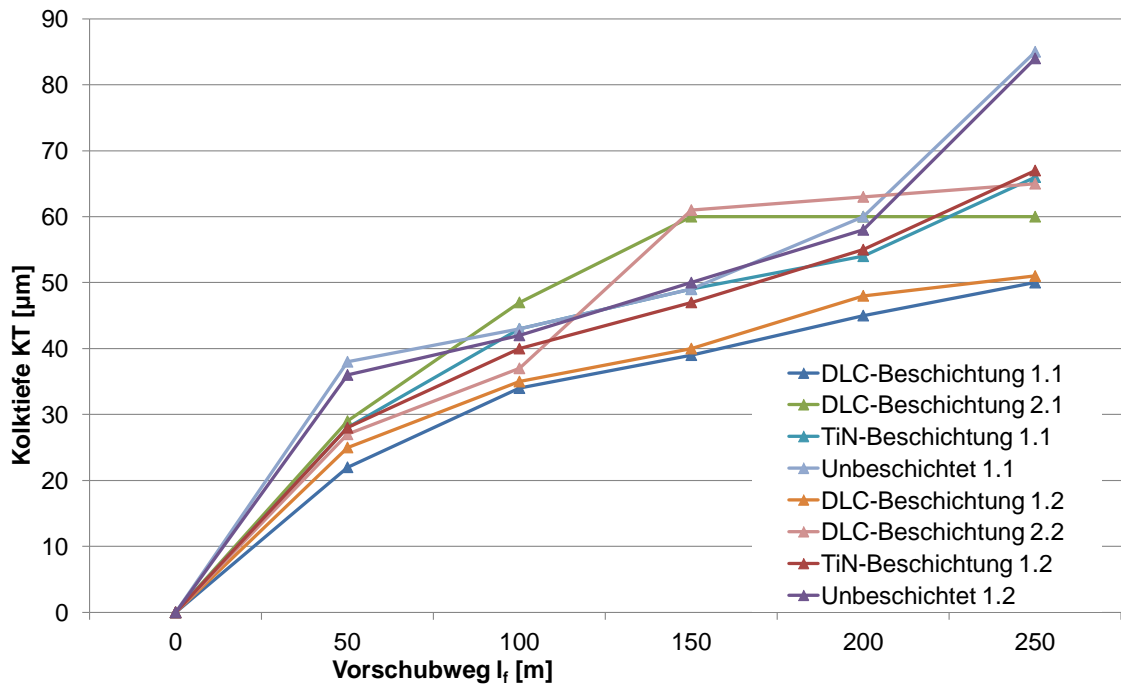


Abbildung 39: Verschleiß von Hartmetallfräsern mit Werkzeugdurchmesser 6 und 4 mm

Durch eine Verringerung des Werkzeugdurchmessers kann einerseits die Standzeit erhöht und der Verschnitt verringert werden.

Nachdem das Konzept der Fräsbearbeitung geklärt war, folgte ein Optimierungsschritt. Die derzeit verwendeten Werkzeuge bestehen aus Hartmetall mit einer TiN-Beschichtung. Um die Werkzeugkosten pro Meter bearbeiteter Bauteilkante weiter zu senken, wurden im Vergleichstest verschiedene Beschichtungen untersucht. Es wurden zwei DLC-Beschichtungen ausgewählt und diese mit der aktuellen TiN-Beschichtung und unbeschichteten Werkzeugen verglichen. Bei beiden DLC-Beschichtungen handelt es sich um wasserstofffreie DLC-Beschichtungen, wodurch eine bessere Haftfestigkeit erwartet wird. DLC-Beschichtung 1 ist eine kommerziell erhältliche Beschichtung mit einer hohen Oberflächengüte und niedriger gemittelter Rautiefe von  $Rz \approx 0,45$   $\mu\text{m}$ . DLC-Beschichtung 2 ist eine neu entwickelte Beschichtung, welche mit dem Laser-Arc-Verfahren aufgebracht wird. Die gemittelte Rautiefe dieser Beschichtung betrug  $Rz \approx 0,75$   $\mu\text{m}$ . Das Laser-Arc-Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Beschichtungsrate aus.

Bewertungskriterium war die Verschleißrate. Als Verschleißkriterium wurde die Kolkentiefe an der Werkzeugschneide verwendet, welche sich durch die in sie einschneidende Decklage ausbildet.



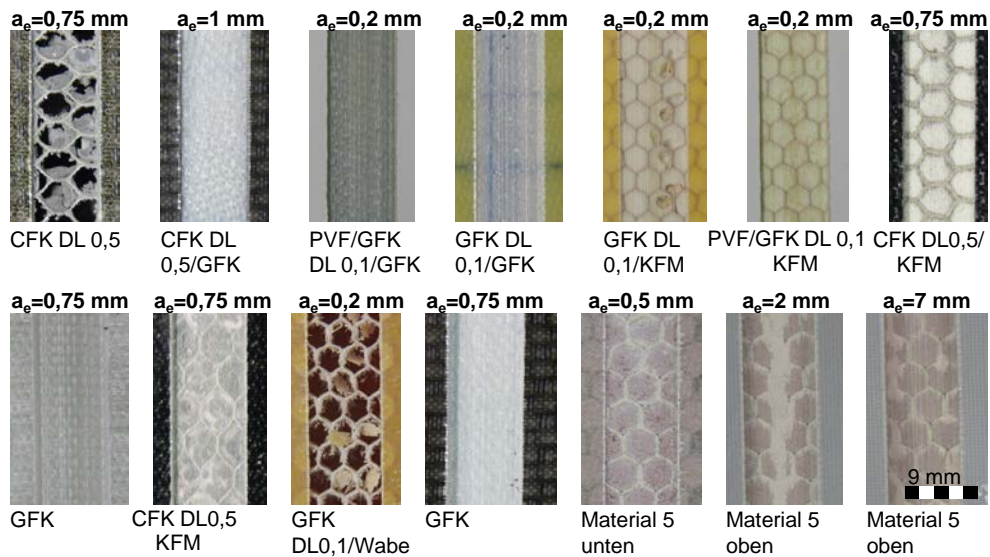
MQS15\_5232

Abbildung 40: Kolkiefe über Vorschubweg bei verschiedenen beschichteten Fräswerkzeugen

In Abbildung 40 ist die Kolkiefe über den Vorschubweg aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass DLC-Beschichtung 1 Vorteile hinsichtlich der Verschleißrate bietet verglichen mit der derzeit verwendeten TiN-Beschichtung, DLC-Beschichtung 2 und unbeschichteten Werkzeugen. Bei gleicher Werkzeuggeometrie und Prozessparametern fällt die Kolkiefe wesentlich geringer aus und eine Beschichtung dieser Art ist anzustreben.

Zusätzlich wurde die Zerspanung von Sandwich- und GFK-Einlegematerialien durch alternative Bearbeitungsverfahren untersucht. So bietet das Trennschleifen eine sehr gute Bearbeitungsqualität an der Bauteilkante. Abbildung 41 zeigt die erzielte Bearbeitungsqualität verschiedener Materialkombinationen. In weitergehenden Versuchen zeigte sich jedoch, dass sich die Trennscheibe insbesondere bei Arbeitseingriffen  $> 2\text{mm}$ , wenn mit Kernfüllmasse gefüllte Wabe bearbeitet wird, mit Spänen zusetzt. Die schlechte Bearbeitbarkeit der Kernfüllmasse/Wabe ist als Ausschlusskriterium für das Trennschleifen zu sehen, da für die Bearbeitung eines kompletten Sandwichaufbaus ein dreistufiger Prozess aus Trennschleifen der oberen Decklage, Fräsen von gefüllter Wabe und abschließendem Trennschleifen der unteren Decklage nötig wäre. Dies ist nicht im Sinne der angestrebten Senkung der Durchlaufzeit.

Trennscheibendurchmesser  $d_{\text{Trennscheibe}} = 120 \text{ mm}$ , Trennscheibenbreite  $b_{\text{Trennscheibe}} = 9 \text{ mm}$ ,  
Drehzahl  $n = 8300 \text{ min}^{-1}$ , Vorschubgeschwindigkeit  $v_f = 14 \text{ m/min}$ , Gleichlauf, Körnung D427



Abkürzungen: DL = Decklage, KFM = Kernfüllmasse

MQS15\_5123

Abbildung 41: Bearbeitungsqualität durch Trennschleifen

Grundsätzlich bietet die Bearbeitung durch scheibenförmige Werkzeuge den Vorteil niedriger Zerspantemperaturen, da die Prozesswärme überwiegend das Werkzeug aufnimmt und über dieses abgeführt werden muss (Bratukhin & Bogolyubov, 1995). Bei scheibenförmigen Werkzeugen ist bei den vorliegenden Materialstärken immer nur ein kleiner Winkelbereich des Werkzeugs im Eingriff, so dass am übrigen Umfang die Wärme abgeführt werden kann. Im Fortgang des Vorhabens wurde deshalb der Prozess des Kreissägens intensiv betrachtet. Durch die größeren Spankammern eines Sägeblatts wird mehr zerspanntes Material aufgenommen und abgeführt. Zunächst wurden in Versuchen die auftretenden Prozesskräfte untersucht und günstige Prozessparameter bestimmt. Die Spindelleistung wurde betrachtet, da die Säge- und Trennschleifbearbeitung grundsätzlich andere Anforderungen an den Hauptantrieb der Bearbeitungsmaschine stellt und im Falle einer Entscheidung, beide Bearbeitungsprozesse einzusetzen, die Umsetzbarkeit gesichert sein sollte. Bei der Bearbeitung von GFK-Vollmaterial führt eine hohe Schnittgeschwindigkeit zu thermischer Schädigung. Ein hoher Zahnvorschub erzeugt sowohl beim GFK-Vollmaterial als auch beim Sandwichmaterial Delamination. Da Sandwichmaterial und GFK-Vollmaterial auch im Verbund bearbeitet werden, muss eine Parameterkombination gewählt werden, welche die Anforderungen beider Materialien erfüllt.

Zusätzlich war die wirtschaftliche Eignung des Kreissägens und Fränsens zu untersuchen, die sich aus den Bearbeitungskosten und der Bearbeitungszeit bestimmt. Die Bearbeitungskosten setzen sich aus den Maschinenkosten (Maschine, Peripherie, Bediener) und den Werkzeugkosten zusammen. Zur Bestimmung der Werkzeugkosten wurde der Standweg des Sägeblatts und des am häufigsten verwendeten Fräswerkzeugs ermittelt. Als Standwegkriterium wurde das Auftreten von Delamination mit einer Tiefe größer 0,5 mm gewählt. Die Ergebnisse der Untersuchung mit dem Sägeblatt sind in Abbildung 42 gezeigt.

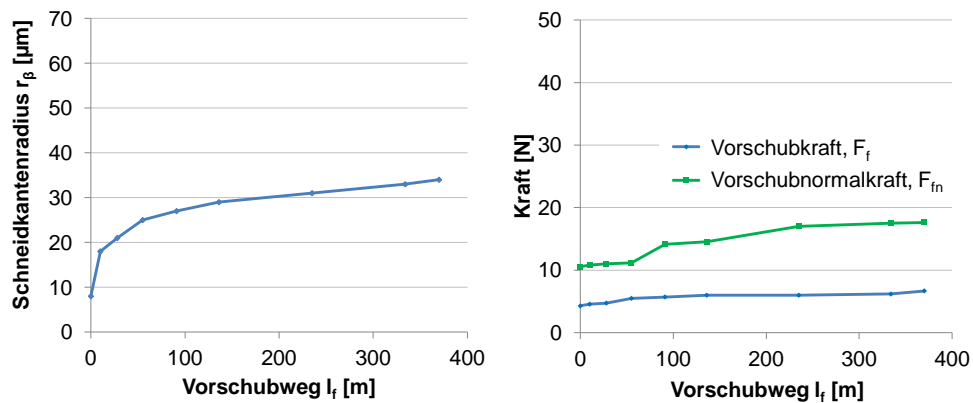


Abbildung 42: Verschleiß und Prozesskräfte des PKD-Sägeblatts über dem Vorschubweg

Es wurde ein Sägeblatt mit PKD-Schneiden und Durchmesser 160 mm verwendet. Die Schneidenzahl betrug  $z = 2$ , da zum Erreichen des Standwegs eines Sägeblatts mit mehr Schneiden ein zu langer Vorschubweg nötig gewesen wäre. Der Standweg ist nach 370 m erreicht. Das Ergebnis für den Standweg des Fräswerkzeugs ist in Abbildung 43 dargestellt. Es wurde ein Fräser aus Hartmetall mit Durchmesser 6 mm und 5 Schneiden verwendet. Der Standweg ist nach 59 m erreicht.

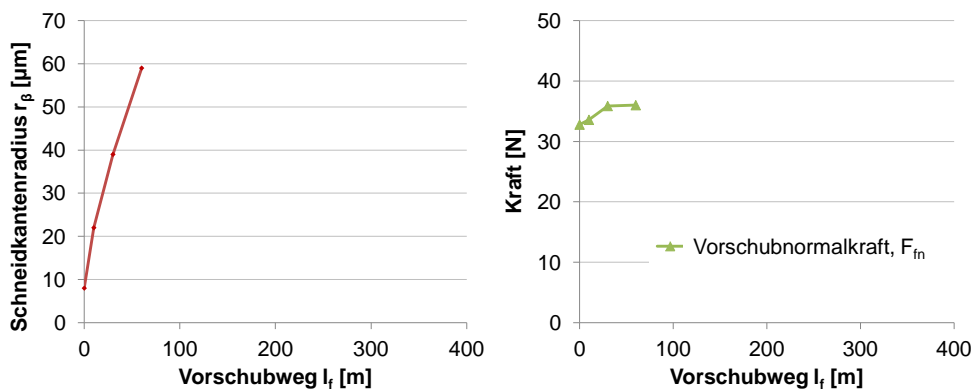


Abbildung 43: Verschleiß und Prozesskräfte des Fräswerkzeugs über dem Vorschubweg

Ein Vorteil des Sägens ist eine geringere Vorschub- und Vorschubnormalkraft im Vergleich zum Fräsen über dem gesamten Vorschubweg hinweg. Wenn vorteilhafter Weise zudem im Gleichlauf gesägt wird, ist die Vorschubnormalkraft in Richtung Sandwichplatte gerichtet, wodurch deren Spannung verstärkt wird. Aus den Werten für den Standweg und den Kosten für die Werkzeuge konnten nun die Bearbeitungskosten durch Werkzeugverschleiß ermittelt werden. Die Bearbeitungszeit ist im Fall einer Maschine die Betriebsmittelgrundzeit  $t_{gB}$ , welche sich aus der Hauptnutzungszeit  $t_n$ , der Brachzeit  $t_b$  und der Nebennutzungszeit  $t_n$  zusammensetzt (REFA, 1998). Zeitanteile, bei denen sich das Werkzeug im Eingriff befindet und wertschöpfende Prozesse durchgeführt werden, werden als Hauptnutzungszeit bezeichnet. Die Zeit, in der die Maschine planmäßig stillsteht, ist die Brachzeit. Zeiten, in denen nicht wertschöpfende Prozesse durchgeführt werden, sind die Nebennutzungszeit. Dies sind beispielsweise Zustellbewegungen, Zeit für Werkzeugwechsel oder Rückfahr- und Umsetzbewegungen des Werkzeugs. Durch Sägen können nur gerade Bauteilkanten hergestellt werden, so dass das Sägeblatt bei Richtungsänderung der geraden Bauteilkante (T-Stoß oder Bauteilecke) um seine Hochachse gedreht werden muss.

Hierfür ist es notwendig, dass das Sägeblatt aus dem Schnitt gebracht wird, um seine Hochachse dreht und wieder in das Material eintaucht. Die Nebennutzungszeit erhöht sich während des Sägeprozesses enorm. Unter Einbeziehung der möglichen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten der Maschinenachsen lässt sich die Nebennutzungszeit für einen Umsetzvorgang des Sägeblatts mit  $t_{n\_Umsetzvorgang} \approx 1,44$  s abschätzen. Dies beinhaltet die Zeit zum Austauschen des Sägeblatts von  $t_{n\_Austauschen} \approx 0,11$  s, zum Drehen des Sägeblatts um  $90^\circ$   $t_{n\_Drehen\_90^\circ} \approx 1$  s und Eintauchen des Sägeblatts  $t_{n\_Eintauchen} \approx 0,33$  s. Die Zeit  $t_{n\_Drehen\_90^\circ} \approx 1$  s gilt bereits für eine gesteigerte Antriebsdynamik der C-Achse und erwies sich als ein kritischer Parameter des Sägekonzeptes.

Je nach Eintauchtiefe des Sägeblatts in das Material muss der Vor- und Nachlauf des Sägeblattes  $y_{max} + \Delta y$  bei der Programmierung der Bearbeitungsbahn berücksichtigt werden, vgl. Abschnitt 6.2.2.2. Es ergeben sich dadurch zusätzliche Bearbeitungsoperationen, da das am Ein- bzw. Auslauf vom Sägeblatt stehen gelassene Material mit einem Schaftfräser nachgearbeitet werden muss. Dies betrifft jeden T-Stoß und jede Ecke der in der Sandwichplatte geschachtelten Sandwichbauteile. Diese Zusatzbearbeitungen fallen zeitlich umso stärker ins Gewicht, je höher deren Anzahl ist.

Enthält eine Sandwichplatte viele kleine Bauteile mit kurzen geraden Bauteilkanten, kann eine Bauteilkante je nach Eintauchtiefe und Sägeblattdurchmesser unter Umständen nicht wirtschaftlich oder nur mit erheblich längerer Nebennutzungszeit bearbeitet werden.

Die Bearbeitungszeit  $t_{ges}$  für eine Sandwichplatte ergibt sich aus folgender Formel:

$$t_{ges} = t_s + t_f + t_{wzuges}$$

Sie setzt sich aus der Zeit für das Sägen  $t_s$ , der Zeit für das Fräsen  $t_f$  und der Werkzeugwechselzeit  $t_{wzuges}$  zusammen. Die Zeit für das Sägen  $t_s$  beinhaltet sowohl die Zeit für Vorschubwege, als auch Beschleunigungs- und Umsetzvorgänge an Bauteilecken und T-Stößen. Die Zeit für das Fräsen beinhaltet ebenfalls die Zeit für Vorschubwege und Beschleunigungsvorgänge. Die Zeit für das Entfernen des prozessbedingt vom Sägeblatt nicht zerspannten Materials ist enthalten. Zur gesamten Bearbeitungszeit kommt noch die Zeit für Werkzeugwechsellvorgänge  $t_{wzuges}$  hinzu, da bei der kombinierten Fräs- und Sägebearbeitung mindestens ein Werkzeugwechsel nötig ist.

Die Kosten zur Bearbeitung einer Sandwichplatte  $k_{ges}$  werden mit folgender Formel berechnet:

$$k_{ges} = k_{lf} + k_m$$

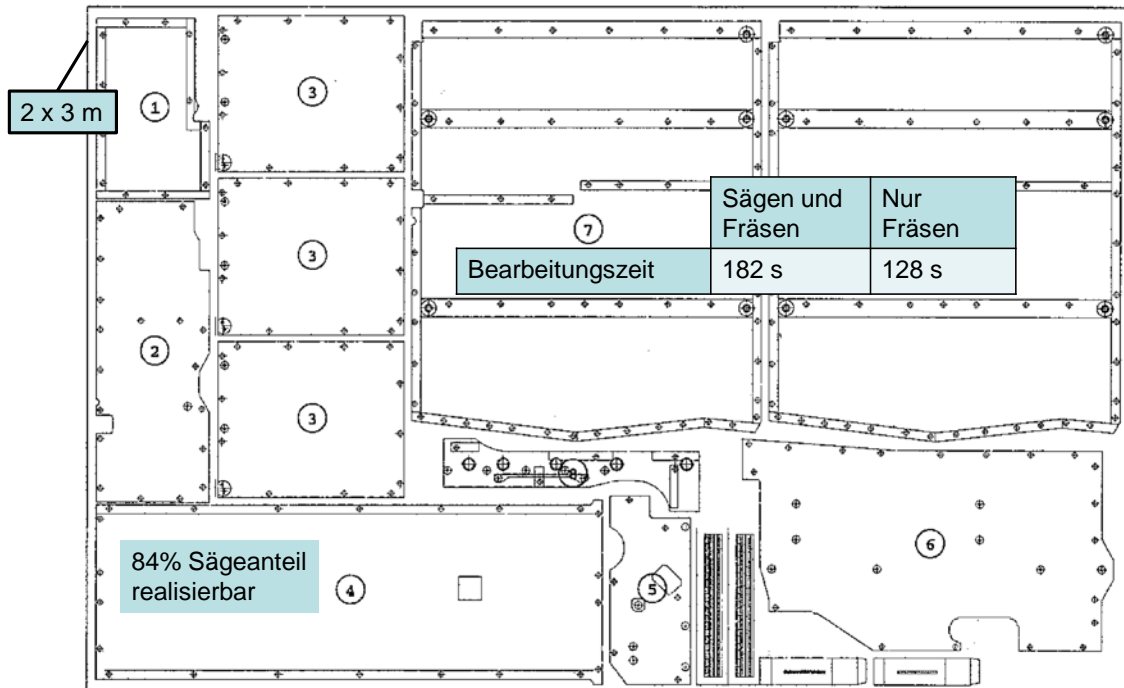
Sie setzen sich aus den Kosten für die Bearbeitung  $k_{lf}$  und den Maschinenkosten  $k_m$  zusammen. Die Kosten für die Bearbeitung  $k_{lf}$  ergeben sich aus den Werkzeugkosten und der Standzeit der Werkzeuge. Die Maschinenkosten  $k_m$  werden aus dem Maschinenstundensatz  $m$  multipliziert mit der Bearbeitungszeit  $t_{ges}$  berechnet:

$$k_m = t_{ges} \cdot m$$

In einem Berechnungstool wurde die Kalkulation der Bearbeitungskosten und -zeit für die kombinierte spanende Bearbeitung durch Sägen und Fräsen von Sandwichbauteile umgesetzt. Anhand ermittelter Eingangsparameter kann berechnet werden, ob für die Bearbei-



tung einer Sandwichplatte das kombinierte Bearbeitungsverfahren wirtschaftlich ist. In Abbildung 44 und Abbildung 45 sind exemplarisch zwei Anwendungsfälle gezeigt. Die Bearbeitungskonturen der Sandwichplatte in Abbildung 44 bestehen aus vielen Kleinteilen mit teilweise gekrümmten Bauteilkanten. Eine Sägebearbeitung ist für diese Bearbeitungskonturen aufgrund der längeren Bearbeitungszeit und höheren Bearbeitungskosten nicht sinnvoll. Die Zeit für Umsetzvorgänge der Säge  $t_{\text{Umsatzvorgänge}}$  ist mit rund 59 s ein wesentlicher Anteil der Bearbeitungszeit  $t_{\text{ges}}$  von 182 s.



MQS15\_5150

Abbildung 44: Beispiel einer Sandwichplatte mit vielen Kleinbauteilen



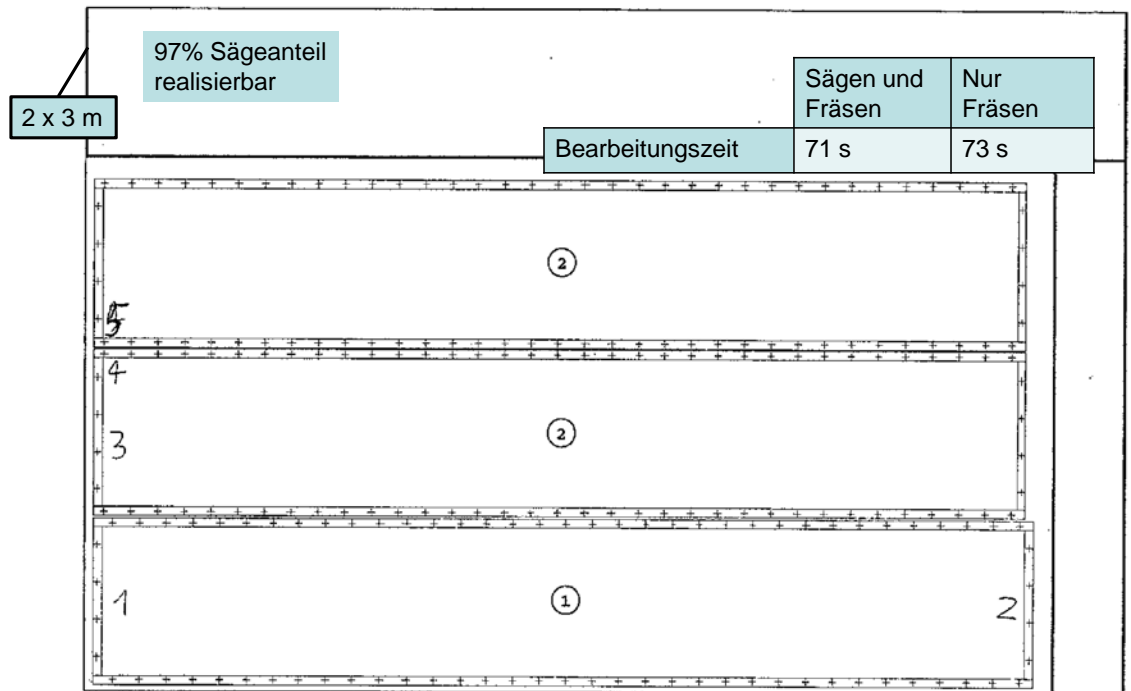


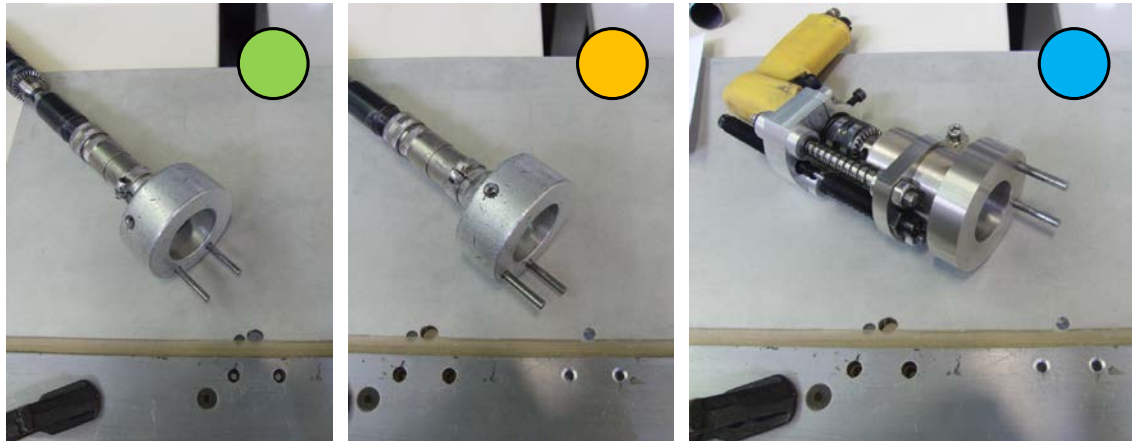
Abbildung 45: Beispiel einer Sandwichplatte mit wenigen Großbauteilen

Die Bearbeitungskonturen der Sandwichplatte in Abbildung 45 bestehen aus wenigen rechtwinkligen Bauteilen. Eine Sägebearbeitung ist für diese Bearbeitungskonturen aufgrund geringerer Bearbeitungskosten und -zeit sinnvoll. Es können 97% der Bauteilkannten mittels Kreissägen erzeugt werden. Die Zeit für Umsetzvorgänge  $t_{\text{Umsetzvorgänge}}$  beträgt hier nur rund 15 s.

Im Rahmen des entwickelten Konzeptes für das Prozesslayout werden die Sandwichplatten nach dem Entformen an der Messstation vermessen. Um die Referenz zwischen gemessenen Geometriedaten (der Sandwichbauteile innerhalb der Sandwichplatte) und der Bearbeitungsmaschine bilden zu können, sind sogenannte Absteckbohrungen in die Sandwichplatte einzubringen. Diese Absteckbohrungen werden auf der Messmaschine optisch gemessen und auf der Bearbeitungsmaschine als Referenz verwendet (vgl. Berichte der Projektpartner). Die korrekte Einmessung hängt maßgeblich von der Bohrungsqualität ab. Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Konzept zum manuellen Bohren mit höchster Qualität hinsichtlich Vermeidung von Delamination und Faserüberständen entwickelt. Dazu wurden Versuche mit verschiedenen Vorrichtungskonzepten, Abbildung 46, und Werkzeugen durchgeführt. Das erste Konzept (grün) zeigt den Ist-Zustand und ist charakterisiert durch zwei Stifte, die in die Pressform für die Sandwichplatte eingeführt werden. Die Stifte werden spielbehaftet in die Vorrichtung eingeführt und referenzieren die Soll-Position der Absteckbohrungen nur sehr ungenau. Bisher wurden die Bohrungen nur zur Grobausrichtung auf der Maschine benötigt. Beim zweiten Konzept (orange) ist der Durchmesser der Stifte auf die Bohrungen in der Form angepasst (Passtifte) und garantiert eine Spielpassung zwischen Form und Bohrvorrichtung. Im dritten Konzept (blau) ist zusätzlich eine Vorschubbremse zwischen Form und Bohrmaschine angebracht, um einen kontrollierten Ein- und Austritt des Bohrwerkzeuges in das Sandwichmaterial sicherzustellen. Geführt wird die Vorschubbremse ebenfalls durch Passtifte in einer Spielpassung. Die Vorschubbremse ist so eingestellt, dass eine maximale Dämpfung anliegt, welche

durch die Maximalkraft von 200 N repräsentiert ist. Bei allen Untersuchungen wurde eine pneumatisch betriebene Handbohrmaschine mit einer Drehzahl von 3000 1/min eingesetzt.

- Maschine
  - Pneumatisch betriebene Handbohrmaschine, Drehzahl  $n = 3000$  1/min
- 3 verschiedene Vorrichtungen
  - Ungedämpft, ausgeschlagene Passstifte ●
  - Ungedämpft, Passstifte  $\varnothing 5$  mm mit Spielpassung zwischen Vorrichtung und Menüform ●
  - Gedämpft mit Vorschubbremse (Maximalkraft 200 N, 2x ACE MA35EUM), Passstifte  $\varnothing 5$  mm mit Spielpassung zwischen Vorrichtung und Menüform ●

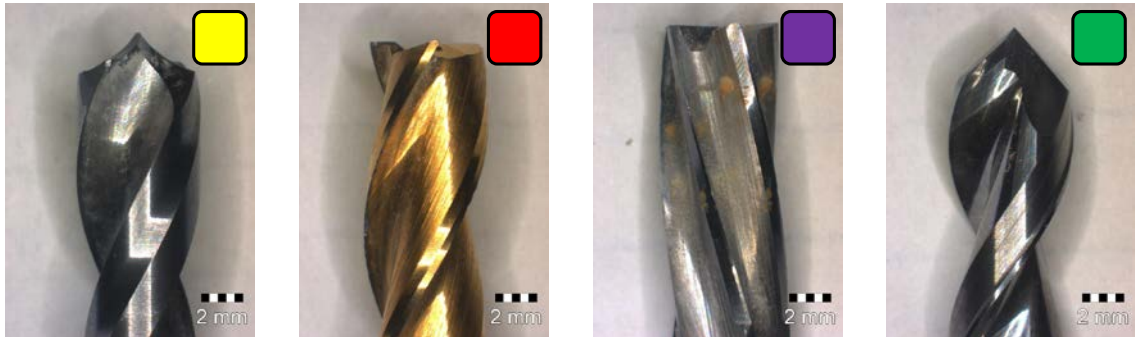


MQS15\_5177

Abbildung 46: Bohrvorrichtungskonzepte für das manuelle Bohren von Sandwichmaterial

In Abbildung 47 sind die verwendeten Werkzeuge gezeigt. Es wurde ein Sichelbohrer (gelb), ein Flachbohrer (rot), ein bohrfähiger Fräser (lila) und ein Bohrer mit  $90^\circ$  Spitzenwinkel (grün) verwendet. Der Versuchsplan umfasste die Kombinationen aus Bohrvorrichtungskonzept und Werkzeug, sowie verschiedene Sandwichmaterialien.

- 3 verschiedene Werkzeuge (alle Ø6 mm)
  - Sichelbohrer (2 Schneiden) ■
  - Flachbohrer (3 Schneiden) ■
  - Bohrfähiger Fräser (5 Schneiden) ■
  - Bohrer mit 90° Spitzenwinkel (2 Schneiden) ■



- Materialien/Aufbauarten
  - Material 2
  - Material 6 und 7
  - Material 8 und 9

MQS15\_5176

Abbildung 47: Bohrwerkzeuge für das manuelle Bohren von Sandwichmaterial

Tabelle 4 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für die Bohrungsqualität (Delamination und Faserüberstände) in Abhängigkeit der Bohrvorrichtungen und der verwendeten Werkzeuge.

Tabelle 4: Prozessmatrix für die Bohrungsqualität

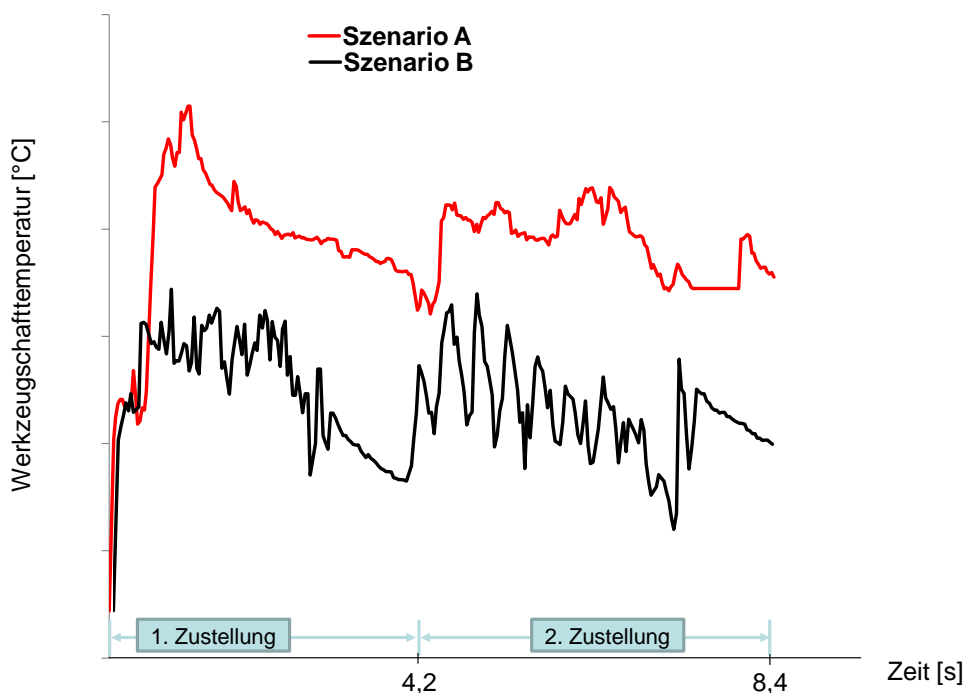
	Sichelbohrer <span style="color: yellow;">■</span>	Flachbohrer <span style="color: red;">■</span>	Bohrfähiger Fräser <span style="color: purple;">■</span>	Bohrer mit 90° Spitzenwinkel <span style="color: green;">■</span>
Unged. <span style="color: green;">●</span>				
Neue Passstifte Unged. <span style="color: yellow;">●</span>				
Vorschub- bremse <span style="color: blue;">●</span>				

MQS15\_5192

Um eine optimale Bohrungsqualität ohne Delamination, Faserüberstände oder Kappenbildung zu erhalten, ist die Kombination aus Bohrer mit 90° Spitzenwinkel (grün) mit einer

vorschubgebremsten Bohrvorrichtung (blau) am zweckmäßigsten. Durch diese Kombination wurden bei allen untersuchten Sandwichmaterialien eine gute Bohrungsqualität erzeugt.

Während der Untersuchungen zur Zerspanung kritischer Materialkombinationen (AP3a2) zeigte sich, dass die thermische Schädigung von GFK beim Taschenfräsen zwar verhindert werden kann, aber nur unter Hauptzeiterhöhung durch ein geringes Zeitspanvolumen. Um dem entgegenzuwirken, wurden Versuche mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt, um das Zeitspanvolumen nicht aber den Arbeitseingriff zu steigern und somit die Hauptzeit zu reduzieren. Das Ergebnis ist in Abbildung 48 gezeigt. Szenario A repräsentiert schlechte Prozessbedingungen mit ungünstiger Bearbeitungsstrategie, hohem Arbeitseingriff und schlechter Spanabfuhr (ohne Verwendung einer Druckluftdüse). Für Szenario B wurde eine günstige Bearbeitungsstrategie, geringer Arbeitseingriff bei hoher Vorschubgeschwindigkeit und guter Spanabfuhr (Verwendung einer Druckluftdüse) eingesetzt. In den Versuchen zu den Bearbeitungsstrategien zeigt sich, dass ein Werkzeug mit negativem Rückspanwinkel  $\gamma_p = -19^\circ$  tendenziell geringere Werkzeugschneidentemperaturen zur Folge hat als ein Werkzeug mit positivem Rückspanwinkel  $\gamma_p = 23^\circ$ . Die höheren Werkzeugschneidentemperaturen bei Verwendung des Werkzeugs mit positivem Rückspanwinkel  $\gamma_p = 23^\circ$  korrelierten mit höher aufgeworfenen Spänen im Gegensatz zu den Spanaufwürfen bei Verwendung des Werkzeugs mit negativem Rückspanwinkel  $\gamma_p = -19^\circ$ . Die Ursache ist also die Isolierwirkung der höher aufgeworfenen Späne. Die beiden Kurven (Abbildung 48) zeigen den Temperaturverlauf über die Bearbeitungsoperation, also die erste Zustellung für die Taschenkontur mit  $\varnothing 20$  mm und die zweite Zustellung für die Taschenkontur mit  $\varnothing 30$  mm. Eine Halbierung der auftretenden Werkzeugschafttemperatur ist auf diesem Wege möglich.



MQS15\_5086

Abbildung 48: Einfluss der Bearbeitungsstrategie auf die Werkzeugschafttemperatur

#### **6.2.3.1.4 AP3a6 – Sicherstellung Konzept unter Industriebedingungen**

Um die in Versuchen ermittelten Ergebnisse im späteren Gesamtkonzept umsetzen und reproduzieren zu können, sind bestimmte Anforderungen zu berücksichtigen. Dieses Arbeitspaket befasste sich mit der Zusammenstellung dieser Anforderungen und der Ermittlung entscheidender Parameter und Werte. Es konnten folgende Anforderungen geklärt werden:

- Die Genauigkeit eines Wende- und Einmessvorgangs konnte in Versuchen bestimmt werden
- Der Sägeprozess ist geeignet die Anforderungen hinsichtlich Qualität zu erfüllen, ein einwechselbares Sägeaggregat ist vorzusehen
- Die Prozessparameter und Werkzeuggeometrie für den Sägeprozess konnten in Versuchen bestimmt werden
- Die Prozesskräfte des Sägeprozesses konnten geklärt werden
- Die maximal erforderliche Spindelleistung beim Sägen konnte mit 5 kW bei einer Drehzahl von  $n = 9000 \text{ min}^{-1}$  bestimmt werden
- Es konnten Aussagen über die Standzeit eines Sägeblattes getroffen werden
- In Versuchen mit dem Absaug- und Kühlkonzept konnten zulässige Werte für Düsendruck und -abstand zur Werkzeugachse bestimmt werden, welche eine effektive Funktion ermöglichen
- Die Wirtschaftlichkeit des kombinierten Säge- und Fräsprozesses, mit den dazugehörigen Prozessgrenzen wurde ermittelt
- Der industrielle Nutzwert verschiedener Beschichtungen konnte ermittelt werden und gezeigt werden, dass die technologische Eignung einer DLC Beschichtung gegeben ist

Diese ermittelten Anforderungen sind in das Maschinekonzept eingeflossen und gewährleisten so die Umsetzbarkeit unter Industriebedingungen.

#### **6.2.3.2 AP3b – Absaugung und Kühlung**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets galt es zu klären welche grundlegenden Effekte bei der Zerspanung von Sandwichmaterial auftreten und wie sie positiv durch Absaugung und Kühlung beeinflusst werden können.

##### **6.2.3.2.1 AP3b1 – Grundlagenuntersuchung Kühlung**

Im Rahmen des Arbeitspakets Grundlagenuntersuchung Kühlung wurde der Zerspanprozess von Sandwichmaterial hinsichtlich der Wirkungsweise einer Prozesskühlung untersucht.

Die Ist-Analyse zeigte, dass eine schlechte Spanabfuhr maßgeblich die Bauteilqualität beeinflusst. Die nicht abgeführten Späne können zwischen Decklage und Wabe oder zwischen Sandwichplatte und Aufspannung gedrückt werden, was zu Decklagenablösung, Delamination oder Zerstörung ganzer Bauteile führt. Weiterhin erhöhen die in der Nut verbliebenen Späne den Entgrat-, Putz- und Nacharbeitsaufwand und führen zu einem Verschleppen der Späne in nachgelagerte Produktions- und Montagebereiche.

Das aktuelle Werkzeug verfügt über Spanbrecher, die die Spanabfuhr verbessern sollen. Diese sind jedoch ein wesentlicher Kostenfaktor bei der Werkzeugherstellung und es galt zu klären, unter welchen Bearbeitungsbedingungen auf die Spanbrecher verzichtet wer-

den kann. In diesem Zusammenhang war zu untersuchen, ob ein gerichtetes Ausblasen der Nut in Kombination mit einer lokalen Absaugung für eine bessere Spanabfuhr sorgt.

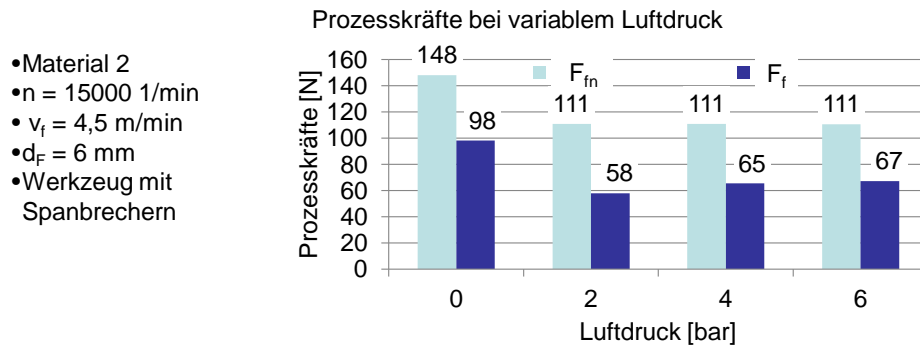
Abbildung 49 zeigt die Bearbeitungskräfte bei unterschiedlichem Luftdruck. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Luftdruck die Bearbeitungskräfte sinken. Die vereinzelt Späne werden unmittelbar nach dem Zerspanvorgang abgeführt und nicht mehrfach zerspannt oder in die Prozesszone eingezogen.

- Späne in der gefrästen Nut



Vorschubrichtung →

- Arbeitsraumabsaugung wirkungslos
- Verschleppung von Staub/Nacharbeit
- Decklagenablösungen an Fräskante
- Aufheizung Werkzeug und Werkstück
- Zerspankraftanstieg
- Spannprobleme



MQS15\_5097

Abbildung 49: Spanabfuhr beim Besäumen von Sandwichmaterial

### 6.2.3.2.2 AP3b2 – Grundlagenuntersuchung Absaugung

Im Arbeitspaket Grundlagenuntersuchung Absaugung wurden Themenstellungen zur Absaugung der entstehenden Späne während der Sandwichmaterialzerspannung erarbeitet. Die Ergebnisse mündeten in ein Konzept zur Absaugung und Kühlung. Ziel sind nacharbeitsfrei aus der Sandwichplatte herausgetrennte Sandwichbauteile.

In Grundlagenuntersuchungen zeigt sich, dass ein wesentliches Problem die Spanabfuhr ist. Die Späne verbleiben nach der Zerspannung in der Fräsnut und können nicht abgesaugt werden. Es galt zunächst eine Möglichkeit zum Vereinzeln der Späne zu finden. Dies wurde im Verlauf des Projektes mit der nachgeführten Druckluftdüse erreicht. Es zeigt sich jedoch auch, dass die vereinzelt Späne durch die Druckluft im gesamten Arbeitsraum der Maschine verteilt werden. Selbst unter Verwendung einer Raumabsaugung konnten die Späne nicht vollständig erfasst werden. Es wurde deshalb ein Absaug-Blasdüsen-Konzept entwickelt, welches wirkstellennah die Späne abführt mit dem Ziel die Späne möglichst nah an der Prozessstelle lokal zu erfassen und ihnen keinen Platz zur Ausbreitung zu bieten.

### 6.2.3.2.3 AP3b3 – Konzepterstellung und Auslegung Kühlung und Absaugung

Da die Verwendung von Druckluft zur Vereinzelnung der Späne grundsätzlich als positiv zu bewerten war, wurde ein Konzept mit einer nachgeführten Druckluftdüse entwickelt. Eine Druckluftdüse folgt dem Bearbeitungswerkzeug entlang der Vorschubbahn und leitet



Druckluft in die gefräste Nut. Die Nachführung der Düse hinter dem Fräswerkzeug kann über verschiedene Konzepte realisiert werden:

- Offline über Postprozessor bspw. im Anschluss an die NC-Korrektur
- Online über Verrechnung innerhalb der CNC-Steuerung
- Online über zusätzliches externes Analogmodul zur 2D-Achskompensation/Abstandskontrolle

Konzept 1 "Offline über Postprozessor" wurde als das sinnvollste Konzept bewertet, da durch die in AP1 ermittelte Lagekorrektur der Bauteile in der Sandwichplatte bereits ein Postprozessorlauf zur Korrektur des NC-Programms nötig ist, im Rahmen dessen die entsprechende Düsenprogrammierung erfolgen kann. Um die Wirksamkeit der Düsennachführung zu zeigen, wurde ein Versuchsaufbau mit einer Bearbeitungskontur in Form eines Mäanders erstellt. Der gesamte Vorschubweg betrug rund 9 m. Es konnte gezeigt werden, dass die gefräste Nut vollständig von Spänen befreit war (Abbildung 50).

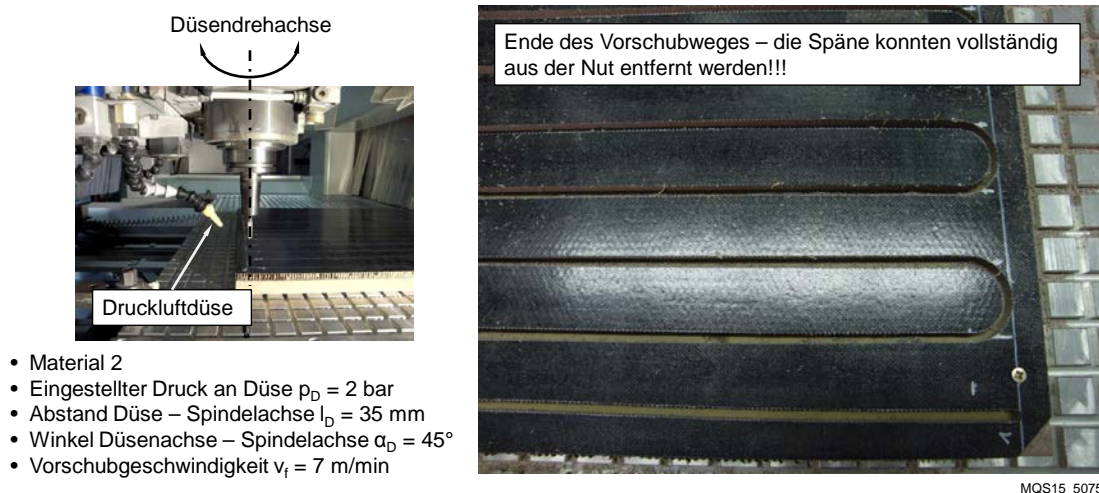


Abbildung 50: Düsenanordnung und Versuchsaufbau zur Düsennachführung

Die Absaugung der nun vereinzelt Späne soll über das Absaug-Blasdüsenkonzept geschehen, welches als Lokalabsaugung gestaltet ist. Der Vorteil einer solchen Lokalabsaugung liegt in der geringen Leistungsaufnahme bei verbesserter Absaugwirkung. Die verwendete Raumabsaugung hatte eine Anschlussleistung von 22 kW, wohingegen das Absaugaggregat des Absaug-Blasdüsen-Konzeptes (Lokalabsaugung) nur eine Anschlussleistung von 4 kW hat. Dies entspricht einer Senkung der Anschlussleistung um 75%. Das Absaug-Blasdüsen-Konzept besteht aus zwei Hauptelementen: Der Blasdüse, welche die Späne vereinzelt und der den Bearbeitungsprozess umschließenden Absaughaube. Die Blasdüse ist vorzugsweise in der Absaughaube angebracht und wird nach dem beschriebenen Verfahren dem Prozess nachgeführt. Da die Bearbeitung der Sandwichplatten, aufgrund

des im Vorhaben entwickelten Maschinenkonzeptes, von beiden Seiten jeweils auf halber Bauteildicke geschehen wird, ist eine Verdopplung der Vorschubgeschwindigkeit nötig, um die gleiche Produktivität zu erhalten. Es konnte gezeigt werden, dass das Absaug-Blasdüsen-Konzept eine von Spänen befreite Nut und Sandwichplatte bei doppelter Vorschubgeschwindigkeit auf halber Bauteildicke als auch bei einfacher Vorschubgeschwindigkeit auf voller Bauteildicke, bewerkstelligen kann. Das Zeitspanvolumen erhöht sich nicht. Auf die einzelnen Elemente des Absaug-Blasdüsen-Konzeptes wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

#### 6.2.3.2.4 AP3b4 – Integration ins Maschinenkonzept

Abbildung 51 zeigt das Absaug-Blasdüsen-Konzept mit Haube, Düse und Absaug Schlauch. Am unteren Teil der Haube ist ein Bürstenkranz befestigt, der zum einen eine gewisse Flexibilität der Haube hinsichtlich des Abstandes zur Bauteiloberfläche ermöglicht und zum anderen den Saugstrom nicht unnötig einengt. Die Blasdüse wird durch den Bürstenkranz in das Innere der Haube geführt und über die Drehachse der Werkzeugmaschine in die Bearbeitungsnut gerichtet.

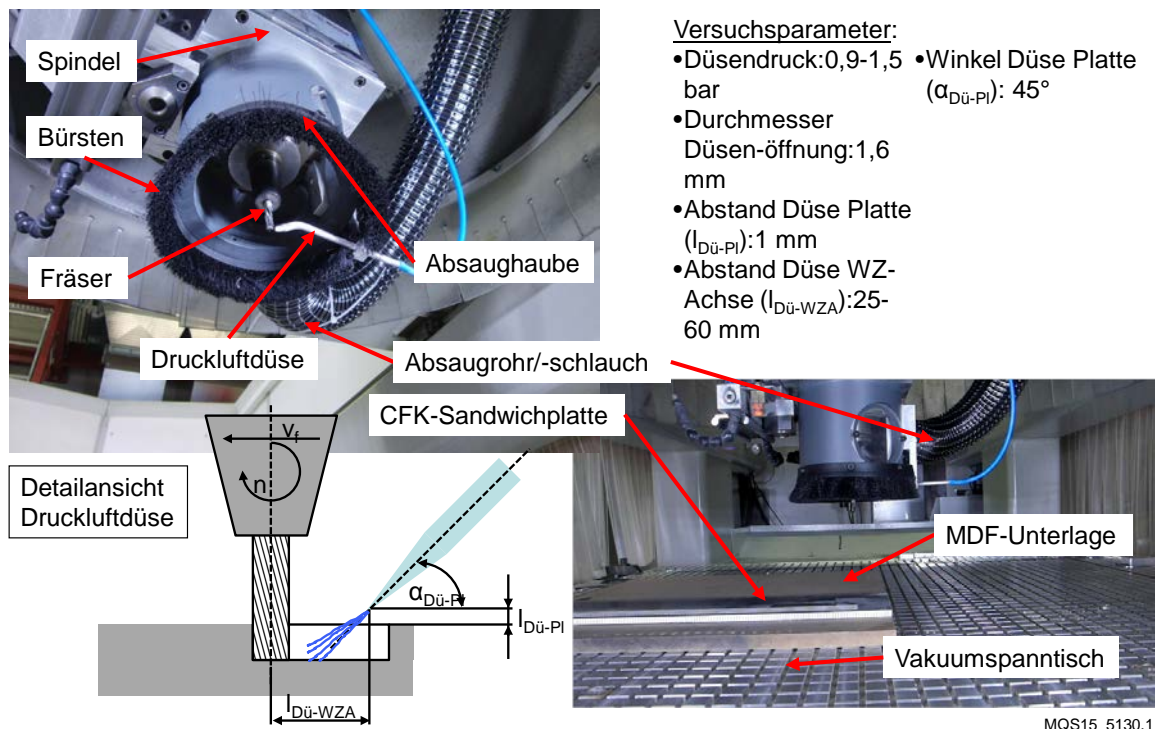


Abbildung 51: Absaug-Blasdüsen-Konzept zur werkstellennahen Erfassung von Spänen

#### 6.2.3.2.5 AP3b5 – Erprobung

Nachdem im AP3b3 die Tauglichkeit und Machbarkeit der Düsennachführung, Vereinzelung der Späne durch Druckluft und Absaugung der vereinzelt Späne gezeigt werden konnte, wurde im Rahmen der Erprobung ein Optimierungsschritt durchgeführt.

Um umständlichen Einstellarbeiten an der Düse entgegenzuwirken, war es Ziel den Abstand zwischen Werkzeugachse und Düse ( $l_{Dü-WZA}$ ) zu maximieren um nicht im Werkzeugdurchmesser eingeschränkt zu sein, jedoch den Düsendruck nicht höher als nötig zu wählen. Es wurde deshalb eine Grenzwertanalyse durchgeführt. Die variierten Parameter waren der Düsendruck in Abhängigkeit des Abstands von Düsenaustritt zu Werkzeugachse.



In den Versuchen konnte ein Grenzwert für den Abstand zur Werkzeugachse bzw. den nötigen Düsendruck bestimmt werden. Es ist also möglich bei höchstmöglicher Flexibilität und geringem Düsendruck nacharbeitsfreie Sandwichbauteile mittels des Absaug-Blasdüsen-Konzeptes zu fertigen.

### **6.2.3.3 AP3c – Kennzeichnung**

Das Arbeitspaket Kennzeichnung befasste sich mit der Erstellung eines Konzeptes zur Kennzeichnung der, in die Sandwichplatte eingebetteten, Sandwichbauteile. Es teilte sich auf in die Unterarbeitspakete Prinzip Bauteilkennzeichnung und Implementierung Kennzeichnung. Das Unterarbeitspaket Implementierung der Kennzeichnung unterlag keiner Förderung und wird/wurde bilateral zwischen EFW und IPMT berichtet.

#### **6.2.3.3.1 AP3c1 – Prinzip Bauteilkennzeichnung**

Ziel des Arbeitspakets Prinzip Bauteilkennzeichnung war es, geeignete Technologien für die Kennzeichnung zu identifizieren, mit der ein möglichst breites Spektrum an Bauteilen nach Kundenspezifikation markiert und so eindeutig identifiziert werden kann. Dazu gehört ggf. auch eine notwendige, temporäre Kennzeichnung.

Das Arbeitspaket wurde federführend durch EFW bearbeitet, da im wesentlichen technische Anforderungen seitens der verschiedenen Endabnehmer der Sandwichbauteile für die Kennzeichnung gesammelt und abgestimmt werden mussten. Seitens des IPMT wurde dabei im Rahmen von Projektgesprächen und Technologierecherchen unterstützt.

#### **6.2.3.3.2 AP3c2 – Implementierung Kennzeichnung**

Das Arbeitspaket 3c2 zur Implementierung der Kennzeichnung war nicht Bestandteil des geförderten Vorhabens und wurde/wird bilateral zwischen EFW und IPMT berichtet.

### **6.2.3.4 AP3d – Prozessüberwachung**

Das Arbeitspaket Prozessüberwachung beschäftigte sich mit der Fragestellung, welche Prozessgrößen generell im Rahmen des vorliegenden Prozesses überwacht werden können. Nach Klärung dieser Frage wurde mit der Konzepterstellung begonnen und Sensorik entwickelt und ausgelegt. Die Erstellung von Algorithmen für die Prozessüberwachung der einzelnen Prozessgrößen schloss sich an. Abgeschlossen wurde das Arbeitspaket mit der Integration in das Maschinenkonzept und der Erprobung.

#### **6.2.3.4.1 AP3d1 – Grundlagenuntersuchungen zur Prozessüberwachung**

Es wurde zunächst in Screening-Versuchen die Fragestellung geklärt, welche Größen prozessüberwacht werden können und für eine Prozessüberwachung in Betracht kommen. Diese bildeten dann die Grundlage für die Konzepterstellung einer Prozessüberwachung.

Es gibt zwei Stellen, an denen der Prozess überwacht bzw. kontrolliert werden kann. Zum einen ist dies parallel zum Bearbeitungsprozess im Rahmen einer Prozessüberwachung (AP3d) und angeschlossen an das Entgraten als eine automatisierte Endkontrolle (AP4).

Abbildung 52 zeigt die Qualitätsmerkmale die generell während des Fertigungsprozesses messbar sind.

Qualitätsmerkmal	Prozessschritt				Mögliche Messmethode				
	Einmessen	Fräsen (beidseitig)	Bürsten/ Verrunden	Endkontrolle	Lock-in Thermographie	Linien- scanner	CCD-Kamera <sup>1</sup>	Schaft- temperatur	Ultraschall <sup>1</sup>
<input type="checkbox"/> Decklagenablösung	✓	✓	✓	✓	(✓)	✓	✓	x	(✓)
<input type="checkbox"/> Stirnflächenversiegelung	x	(✓)	✓	✓	x	✓	✓	x	x
<input type="checkbox"/> Kantengeometrie	x	(✓)	✓	✓	x	x	(✓)	x	x
<input type="checkbox"/> Faserüberstände	x	✓	✓	✓	x	✓	✓	(✓) <sup>2</sup>	x
<input type="checkbox"/> Delamination	x	✓	✓	✓	(✓)	x	(✓)	(✓) <sup>2</sup>	✓
<input type="checkbox"/> Kantennaher Oberflächendefekt	✓	✓	✓	✓	(✓)	(✓)	✓	x	x
<input type="checkbox"/> Thermische Schädigung	x	✓	✓	✓	x	x	(✓)	✓	x

1 Einschränkung bei der Messgeschwindigkeit 2 indirekt

MQS15\_0039.5

Abbildung 52: Möglichkeiten der Messung von Qualitätsmerkmalen während des Fertigungsprozesses

Viele der Qualitätsmerkmale sind nicht durch eine Änderung des Bearbeitungsprozesses beeinflussbar. Faserüberstände und Delamination durch Prozessüberwachung der Kräfte auszuschließen ist praktisch unmöglich, da die Anzahl der möglichen Kombinationen aus Prozess, Verschleißzustand und bearbeitetem Material zu groß ist.

In Screening-Versuchen beim Fräsen von Sandwichmaterial mit CFK- und GFK-Decklagen konnte die Abhängigkeit der Prozesskräfte und der Fräserntemperatur vom Verschleißzustand ermittelt werden. Die Vorschubkraft zeigte die deutlichste Steigerung bei erhöhtem Verschleiß. Auch bei der Passivkraft und Fräserntemperatur zeigten sich signifikante Unterschiede.

Wie in der Ist-Analyse festgestellt wurde, ist es möglich die Temperatur am Werkzeugschaft während der Zerspanung zu überwachen. Es fiel deshalb die Entscheidung die Temperatur und nicht die Vorschubkraft für eine Prozessüberwachung heranzuziehen.

Für das Fräsen von Sandwichmaterial wurde Delamination/Faserüberstände als am aussichtsreichsten für die Prozessüberwachung bewertet, da so das Qualitätsmerkmal direkt überwacht wird und nicht ein indirektes Merkmal.

#### 6.2.3.4.2 AP3d2 – Konzepterstellung Prozessüberwachung

Aus den umfangreichen Recherchen und punktuellen Voruntersuchungen haben sich zwei Ansätze zur Überwachung während des Fräsprozesses ergeben:

- Temperaturüberwachung** – Überwachung der Fräterschafttemperatur mittels Pyrometer mit Rückschluss auf die Wirkstellentemperatur zur Vermeidung thermischer Schädigungen durch ungünstige Schnittparameter oder fortgeschrittenen Werkzeugverschleiß

- **Fräskantenüberwachung** – Überwachung der Kantenbeschaffenheit mittel Laserlinienscanner zur unmittelbaren Detektion von Qualitätsmängeln wie Faserüberständen oder Delamination mit möglichem Rückschluss auf unvorteilhafte Schnittparameter und Werkzeugverschleiß

### Fräskantenüberwachung

Parallel wurden im Rahmen des AP4 Lösungen erarbeitet, wie Faserüberstände, Kanten­geometrie, Delamination und Decklagenablösung (siehe Abbildung 53) kontrolliert werden können.

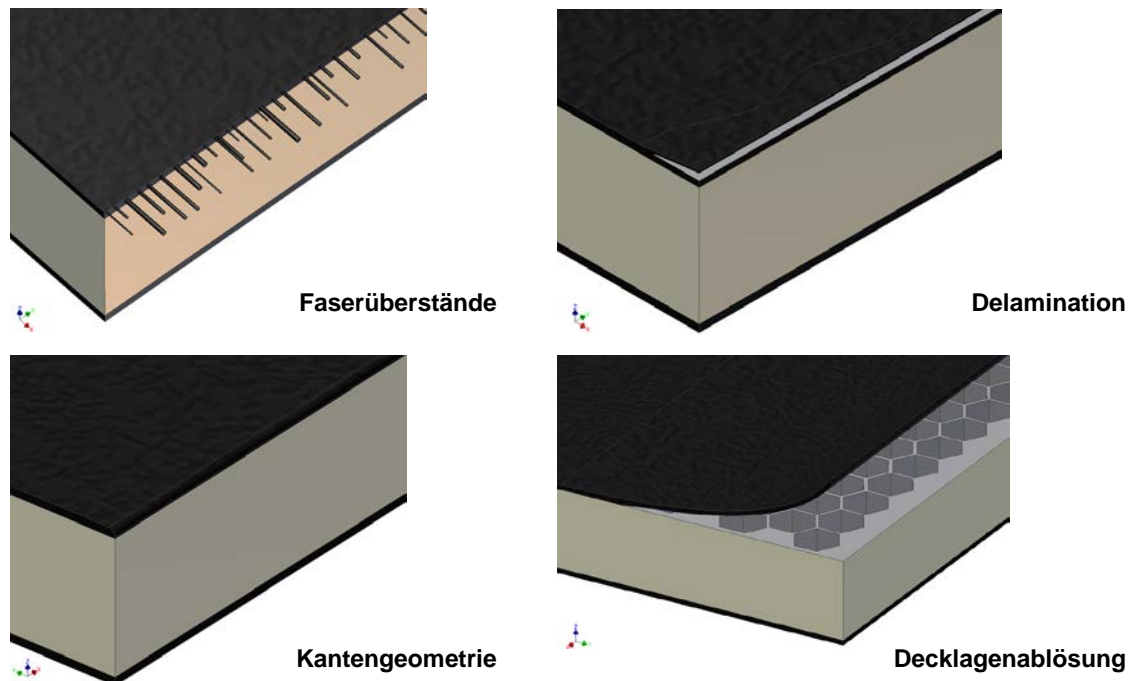


Abbildung 53: Schematische Darstellung der zu detektierenden Kantenmerkmale

Die Erkennung der Faserüberstände soll ggf. schon parallel zum Fräsen, als Prozessüberwachung, geschehen. Es wurden deshalb Versuche zur prozessparallelen Detektion von Faserüberständen durchgeführt. Es zeigte sich, dass bedingt durch die prozessferne Anbringung der Absaughaube der Linienscanner zum Teil vorbeifliegende Späne detektiert, die durch das Messfeld fliegen, und nicht wie gewünscht die Kante fokussiert wird.

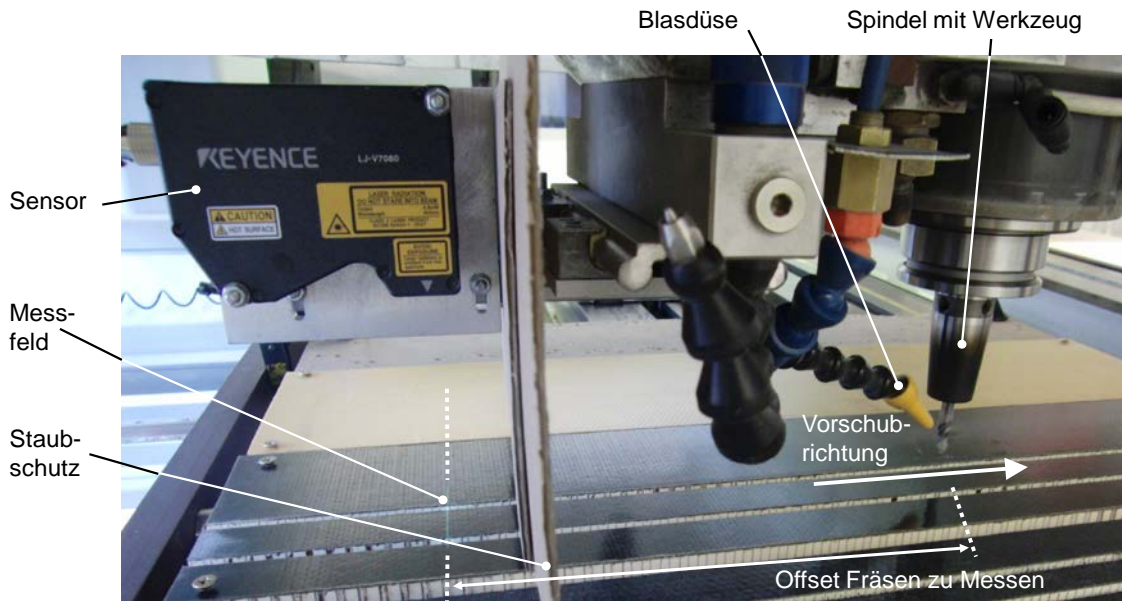


Abbildung 54: Versuchsaufbau zur Detektion von Faserüberständen beim Fräsen

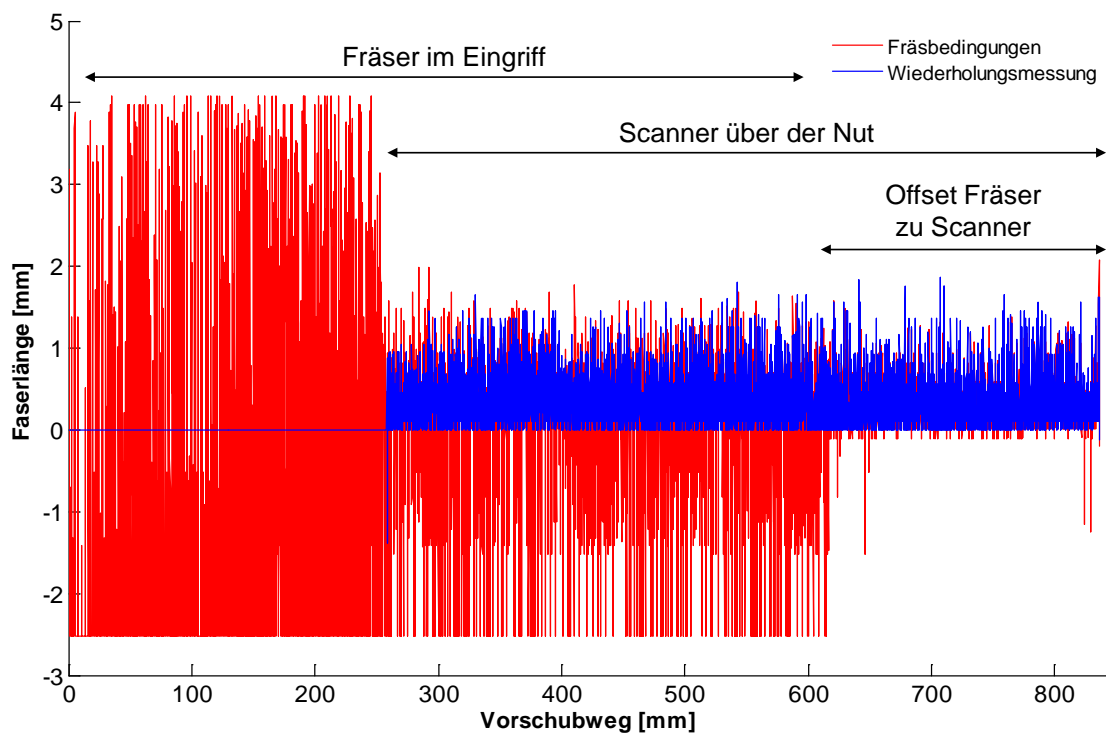


Abbildung 55: Einfluss der Fräsbedingungen auf die Faserüberstanderkennung

In Abbildung 55 ist das Sensorsignal während des Fräsens einer Nut und einer Wiederholungsmessung ohne Fräsprozess zu sehen. Das Signal teilt sich in drei Zeitbereiche auf. Im ersten Bereich ist der Fräser schon im Eingriff, der Linienscanner hat jedoch die Nut noch nicht erreicht, da er in einem gewissen Abstand hinter dem Fräser mitgeführt wird. Im zweiten Bereich ist der Fräser noch im Eingriff und der Linienscanner hat die Nut erreicht und nimmt die Kantengeometrie auf. Im dritten und letzten Bereich hat der Fräser die Nut bereits gefräst und nur der Linienscanner befindet sich im Bereich der Nut. Die Diagramme (rot und blau) zeigen, dass es bedingt durch die ausgeblasenen Späne zu keiner kor-

rekten Messung der Geometrie kommt. Die Wiederholmessung ohne Zerspanung zeigte, dass die Fasern ohne die störenden Späne korrekt erkannt werden können.

### Temperaturüberwachung

Zur Prozessüberwachung der Temperatur beim Fräsen von GFK wurden zunächst Voruntersuchungen getätigt um die einflussreichen Parameter zu bestimmen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 56 gezeigt. Es wird die Temperatur oberhalb der Prozessstelle am Werkzeugschaft gemessen und ins Verhältnis gesetzt zu der Zerspanntemperatur in der Wirkzone.

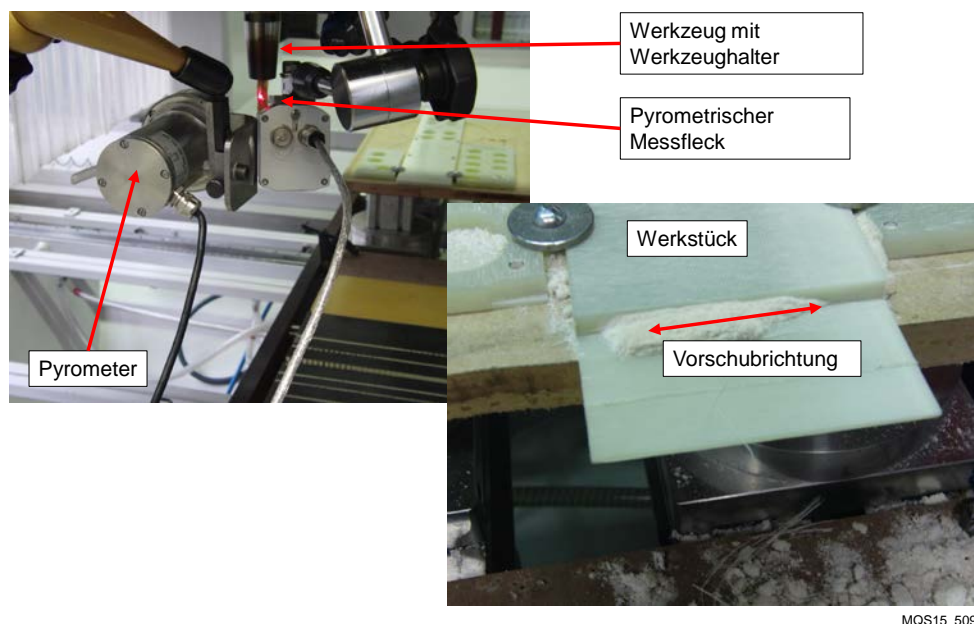


Abbildung 56: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Parametereinflusses auf die Werkzeugschafttemperatur

Durch die Messung der Werkzeugschafttemperatur und den Vergleich des Bearbeitungsergebnisses ist es möglich, eine Grenze für die Werkzeugschafttemperatur je Prozess anzugeben, ab der thermische Schädigung vorliegt. In Abbildung 57 sind Temperaturkurven bei unterschiedlichen Prozessparametern der Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  und Werkzeugen mit Rückspanwinkel  $\gamma_p = -19^\circ$  und  $23^\circ$  gezeigt.

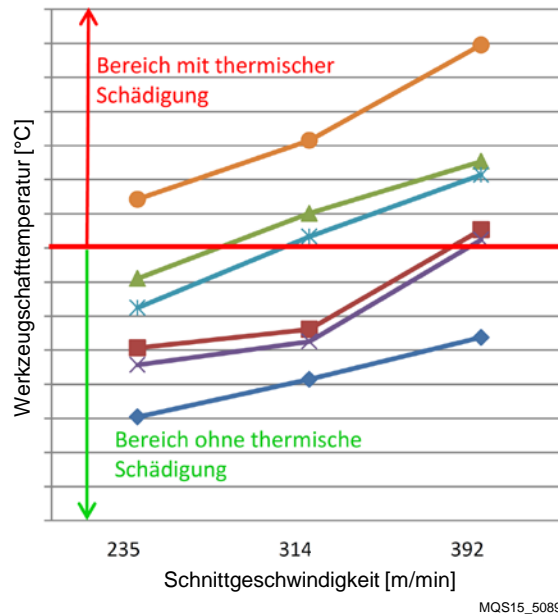


Abbildung 57: Werkzeugschafttemperatur über der Schnittgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Prozessparametern

Infolge des Abstands der Prozessstelle zur Messstelle am Werkzeugschaft wird die durch Wärmeleitung hervorgerufenen Temperaturerhöhung des Schafts erfasst, daher kann nicht direkt von dieser gemessenen auf die Prozesstemperatur geschlossen werden. Im weiteren Fortgang wurde im Rahmen des AP3d3 die Entwicklung und Auslegung der Sensorik der Prozessüberwachungskonzepte bearbeitet.

#### 6.2.3.4.3 AP3d3 – Entwicklung und Auslegung der Sensorik

##### Temperaturüberwachung

Aufbauend auf die Versuche zur thermischen Schädigung an GFK-Einlegeteilen durch die Fräsbearbeitung erfolgte die Auslegung der Sensorik zur Prozessüberwachung. Das Konzept baut auf einer Messung der Temperatur am Werkzeugschaft oberhalb der Bearbeitungsstelle auf. Um die Eignung dieses Konzeptes zu überprüfen, wurde wie folgt vorgegangen:

1. **Eignung von Pyrometer** zur Erfassung der **Schafttemperatur**
2. **Bestimmung des Temperaturverlaufs** entlang des Werkzeuges mit lokaler Wärmequelle (Heizplatte)

Konkret bedeutete das, dass zunächst die Eignung des Pyrometers zur Erfassung der Schafttemperatur getestet werden muss bevor weitergehende Untersuchungen zum vorliegenden Wärmeverlauf eines Werkzeuges (Fräser) durchgeführt werden konnten. Es wurde dazu ein beschichteter Fräser mit den Stirnschneiden auf eine Heizplatte gestellt, um die beim Fräsprozess entstehende Wärme zu simulieren. An zwei am Umfang des unbeschichteten Werkzeugschaftes unmittelbar nebeneinander liegenden Stellen konnte nun die Temperatur bestimmt werden. Die eine Messstelle wurde durch Thermolack geschwärzt und ihr Emissionsgrad  $\epsilon$  zu 0,98 gesetzt. Durch Gleichsetzen der Temperaturen konnte nun der Emissionsgrad an der ungeschwärzten Stelle bestimmt werden. Dies wurde mit 4 verschiedene Werkzeugen gleichen Typs und 10 Durchgängen pro Werkzeug

durchgeführt. Der Emissionsgrad am ungeschwärzten Werkzeugschaft (unbeschichtetes Hartmetall) wurde mit  $\epsilon_{\text{Pyrometer}} = 0,62$  bestimmt.

Weiterhin ist es wichtig, den sich einstellenden Temperaturverlauf zwischen Wärmequelle und Messpunkt des erhitzten Werkzeuges zu kennen. Dieser wurde mit einer Thermokamera bestimmt. Das Werkzeug wurde dabei einseitig mit Thermolack geschwärzt. Die Emissionsgrade für den ungeschwärzten Werkzeugschaft wurden wie bereits vorgestellt ermittelt und angenommen. In Abbildung 58 zeigt sich, dass für den unbeschichteten Werkzeugschaft die Temperaturkurven des ungeschwärzten und geschwärzten Teils sehr gut übereinander liegen. Im Bereich der beschichteten Werkzeugschneiden kommt es bedingt durch die starken Reflektionen zu Abweichungen. Die Temperatur sollte zur Prozessüberwachung demnach auf unbeschichtetem Hartmetall am Werkzeugschaft gemessen werden, um Messfehler zu vermeiden.

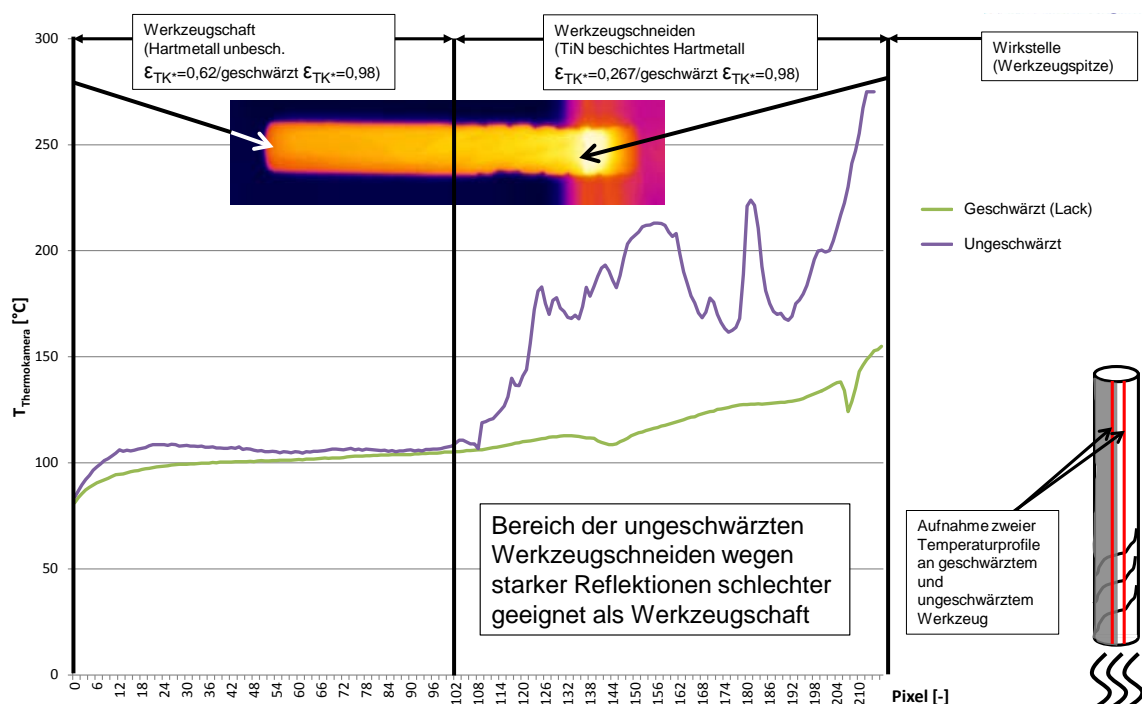


Abbildung 58: Temperaturverlauf am geschwärzten und ungeschwärzten Werkzeug

Für die weitere Kalibration wurden nun drei Messstellen am Werkzeug abgeglichen: Die Temperatur mit dem Pyrometer an der späteren Messstelle, an der Schneidenecke mit einem Thermoelement und am gesamten geschwärzten Werkzeug mit der Thermokamera. In Abbildung 59 ist dies für verschiedene Heizstufen der Heizplatte aufgetragen.



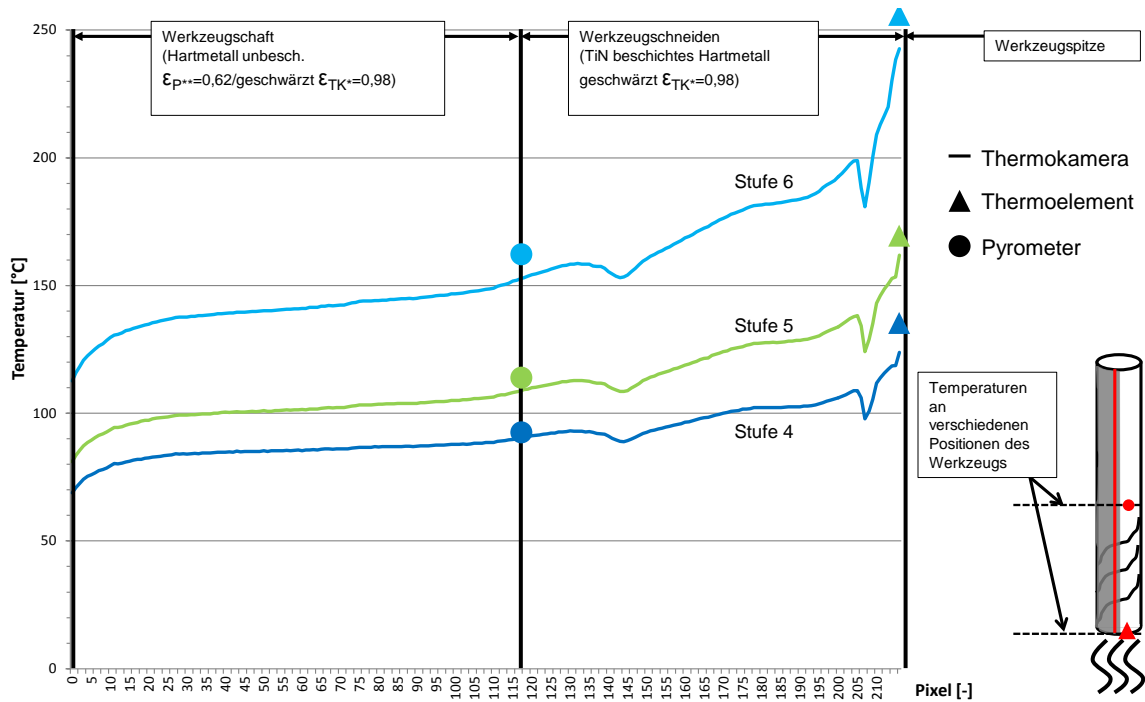


Abbildung 59: Temperaturen an einem stirnseitig erhitzten Werkzeug

Im nächsten Schritt wurde ein Algorithmus/Extrapolationsansatz erarbeitet, der die mathematische Beziehung zwischen gemessener Schafttemperatur zu vorliegender Wirkstellentemperatur beschreibt (AP3d4).

### Fräskantenüberwachung

Ziel der Fräskantenüberwachung ist die Erfassung von qualitätsrelevanten Merkmalen während des Fräsens zur Absicherung eines fehlerfreien Prozesses. Zur Überwachung kommen folgende Merkmale in Betracht:

1. Faserüberstände
2. Decklagenablösung
3. Delamination
4. Kantengeometrie

Diese wurden im Rahmen der Entwicklung und Sensorikauslegung weiter vertieft. Das Konzept zur Überwachung sieht vor, einen Laserlinienscanner quer zur gefrästen Nut hinter dem Bearbeitungsaggregat in Vorschubrichtung nachzuführen.



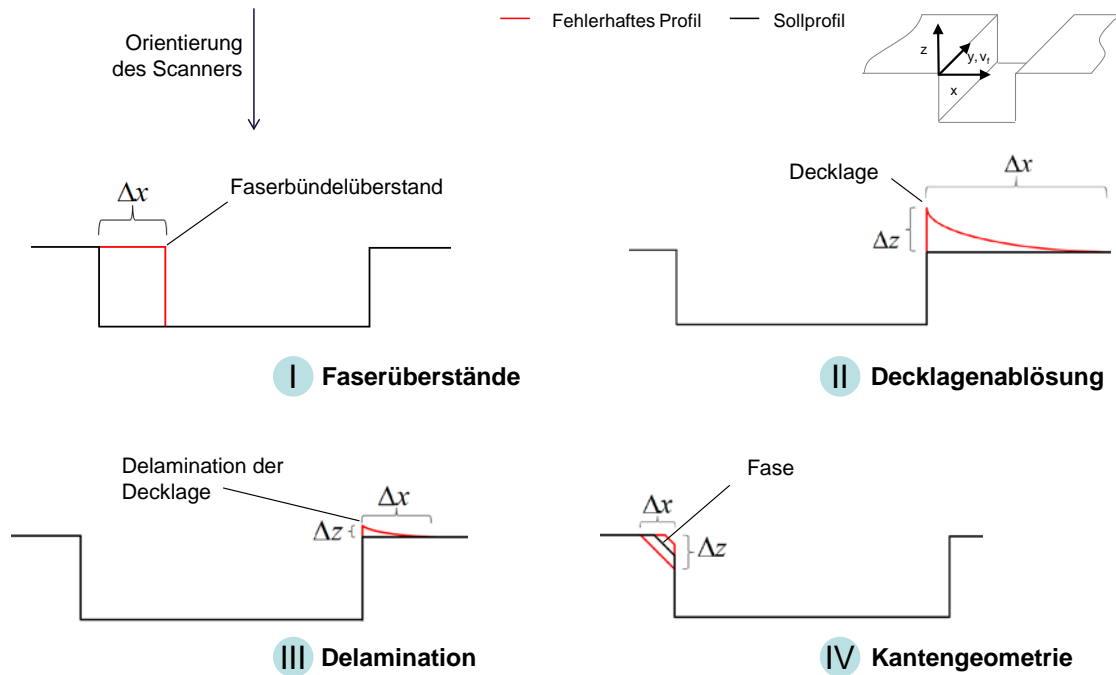
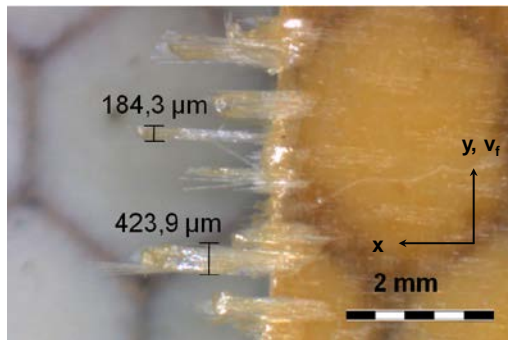


Abbildung 60: Detektionslogik für die Kantenüberwachung

In Abbildung 60 ist für die denkbaren Merkmale jeweils eine Detektionslogik dargestellt. Alle Ansätze gehen davon aus, dass der quer zur Vorschubrichtung aufgeweitete Laserstrahl von oben in die Nut „blickt“. Die von der Scanneroptik erfassten – und zu einem Profil interpolierten – Reflexionen zeigen im fehlerfreien Fall (schwarz dargestellt) eine rechteckige Nut, welche exakt die Breite des Fräasers aufweist. Diese wird in folgenden als ‚Referenzprofil‘ bezeichnet. Für alle Erfassungsmerkmale können nun Abweichungen in Form, Richtung und Ausprägung definiert werden. Faserüberstände, die stets in die Nut hineinragen, werden durch den Scanner als Änderung der Höhe im Nutrandbereich bzw. damit als Verringerung der Nutbreite erfasst. Der Scanner kann beim Vorliegen eines Faserüberstands den dadurch abgeschatteten Nutgrund nicht mehr detektieren. Eine Decklagenablösung wird durch eine Höhenänderung im Randbereich des gefrästen Bauteils detektiert. Liegt die Ablösung einseitig vor, so kann die Höhe der ungeschädigten Decklage als Referenz genutzt werden. Anderenfalls ist eine Absolutreferenzierung notwendig, falls der Nutgrund keine ausreichende Referenz bietet. Für Delamination ist ebenfalls eine Erfassung über die Erhöhung der Decklage im Randbereich denkbar, in Abgrenzung zur Decklagenablösung wird eine viel geringere Ausprägung in x- und z-Orientierung vermutet. Die Kantengeometrie soll über Änderungen der Kante in x- sowie z-Orientierung erfasst werden.

Zur Auswahl und Auslegung verfügbarer Sensoren wurde analysiert, welche Anforderungen der Prozess an die Orts- und Zeitauflösung des Sensors stellt. Dabei ist davon auszugehen, dass Faserbündel mindestens 0,5 mm lang sind – bzw. erst diese Länge qualitätskritisch ist. Zudem zeigt die Mikroskopaufnahme in der linken Hälfte von Abbildung 61, dass von einer Faserbündelbreite von mindestens 0,1 mm ausgegangen werden kann. Marktübliche Sensoren erreichen in x- und z-Orientierung eine Auflösung von 10 – 50  $\mu\text{m}$  und liegen damit eine Größenordnung unterhalb der Anforderungen in dieser Orientierung.

Faserbündelüberstände



Dicke der Faserbündelüberstände für Annahmen bezüglich des Versuchs werden abgeschätzt mit  $d_{\text{Faser}} \geq 100 \mu\text{m}$

## benötigte Bildfrequenz

$$y(t) = \int_{t_1}^{t_2} v_f(t) dt = v_f \cdot (t_2 - t_1)$$

$$= v_f \cdot \Delta t = \Delta y < 0.01 \text{ mm} = \frac{d_{\text{Faser}}}{S}$$

Mit Sicherheitsfaktor  $S=10$

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v_f}{\Delta y}$$

Abbildung 61: Abschätzungen zur Sensorauslegung für den Einsatz zur Kantenüberwachung

Als kritisch bezüglich der Sensorleistung ist hingegen die in Vorschubrichtung (y-Orientierung) notwendige, zeitliche Auflösung zu sehen. In y-Orientierung haben die Faserbündel die geringste geometrische Ausdehnung und der Sensor „integriert“ durch die Vorschubbewegung örtlich. Abbildung 61 zeigt in der rechten Hälfte die entsprechende Abschätzung der Integrationswirkung. Bei Annahme einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit lässt sich die erforderliche Bildfrequenz bestimmen. Diese Randbedingung grenzt die möglichen Sensoren auf die Keyence LJ-V7000 Serie ein. Ein entsprechender Sensor mit Messbereich  $80 \text{ mm} \pm 23 \text{ mm}$  wurde ausgewählt und auf die Anwendung konfiguriert.

Abbildung 62 gibt einen Überblick über die zur Erfassung der Merkmale gewählten Konfigurationen der Sensormessgrößen. Ziel ist der Vergleich und die Bestimmung der Zuverlässigkeit der Messoptionen im Hinblick auf die Messmerkmale. Für Faserüberstände werden eine Höhenmessung am Rand im Vergleich zum Nutgrund und die Abstandsmessung vom Nutrand verglichen. Die Erfassung von Decklagenablösung bzw. Delamination soll über eine Winkelmessung sowie die Höhenmessung am Nutrand verglichen werden. Zur Erfassung der Kantengeometrie muss ein Ist-Profil mit dem erwarteten Soll-Profil abgeglichen werden.

Neben der Einstellung von Ausgabenoptionen ist es erforderlich, für den Scan individuelle Einstellungen für Belichtungsstärke und -intensität sowie diverse andere Optionen zu wählen. Diese sind entscheidend für die Messwerterfassung und speziell bei Faserverbundwerkstoffen herausfordernd.

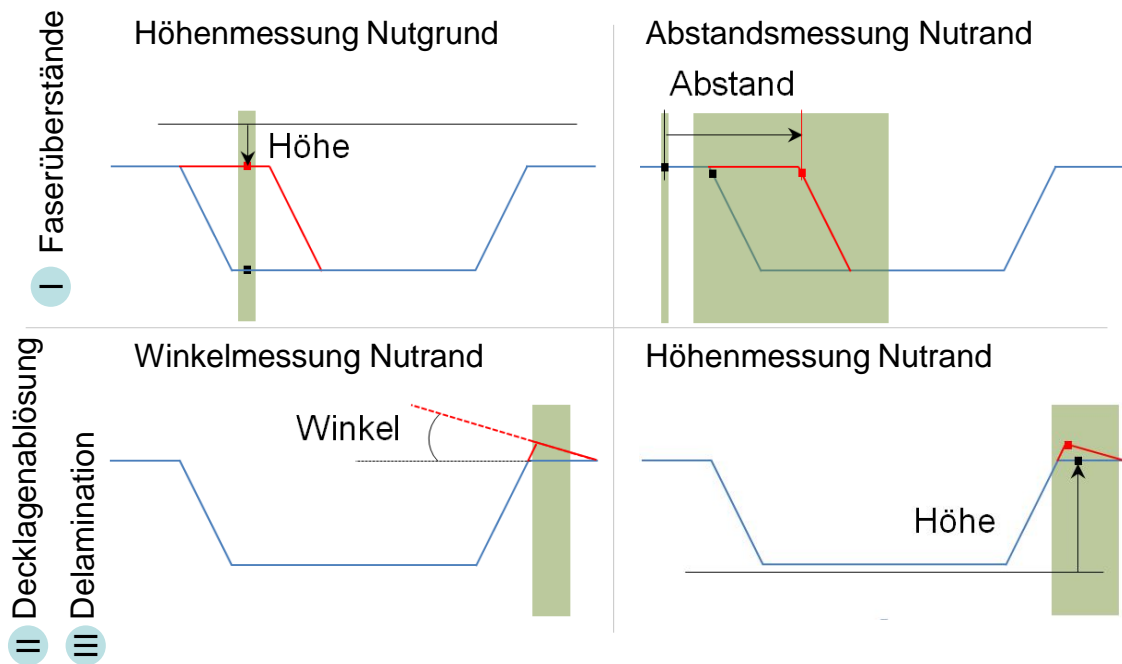


Abbildung 62: Sensorkonfiguration zur Erfassung der Merkmale

Nach der Festlegung der Auswertungsoptionen und Einstellung des Sensorkopfs wurden Versuchsserien durchgeführt, um die Einstellungen zu validieren:

1. Bestimmung der Vorschubgrenzen
2. Test der Einstellungen zur Erfassung von:
  - a. Faserüberständen
  - b. Decklagenablösung
  - c. Delamination
  - d. Kantengeometrie

Abbildung 63 zeigt die Ergebnisse zur Bestimmung bzw. Validierung der berechneten Vorschubgrenzen. Die Versuche wurden an einem transparenten Sandwichmaterial mit GFK-Decklagen durchgeführt. Die Fasern sind durch ihre weitgehende Transparenz schwieriger zu erfassen als CFK-Faserbündel. Die Diagramme zeigen die Höhengabe über dem Nutgrund und über den Vorschubweg bzw. Nutabschnitt aufgetragen. Die Versuche wurden in mehrfacher Wiederholung mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten über demselben Nutabschnitt durchgeführt. Es zeigt sich deutlich, dass die Erhöhung des Vorschubs zu einem zunehmenden Integrationseffekt führt und die Auflösung in y-Orientierung erwartungsgemäß abnimmt. Die Schrittweiten in der Ausgabe des Laserscanners entsprechen Messschritten von 5, 70 bzw. 140  $\mu\text{m}$ . Damit zeigt sich zum einen, dass die Profilfrequenzen des Datenblatts nicht erreicht werden. Zum anderen werden alle Fasern bei dieser Messung als auch bei umfangreicheren Versuchen sicher erfasst.

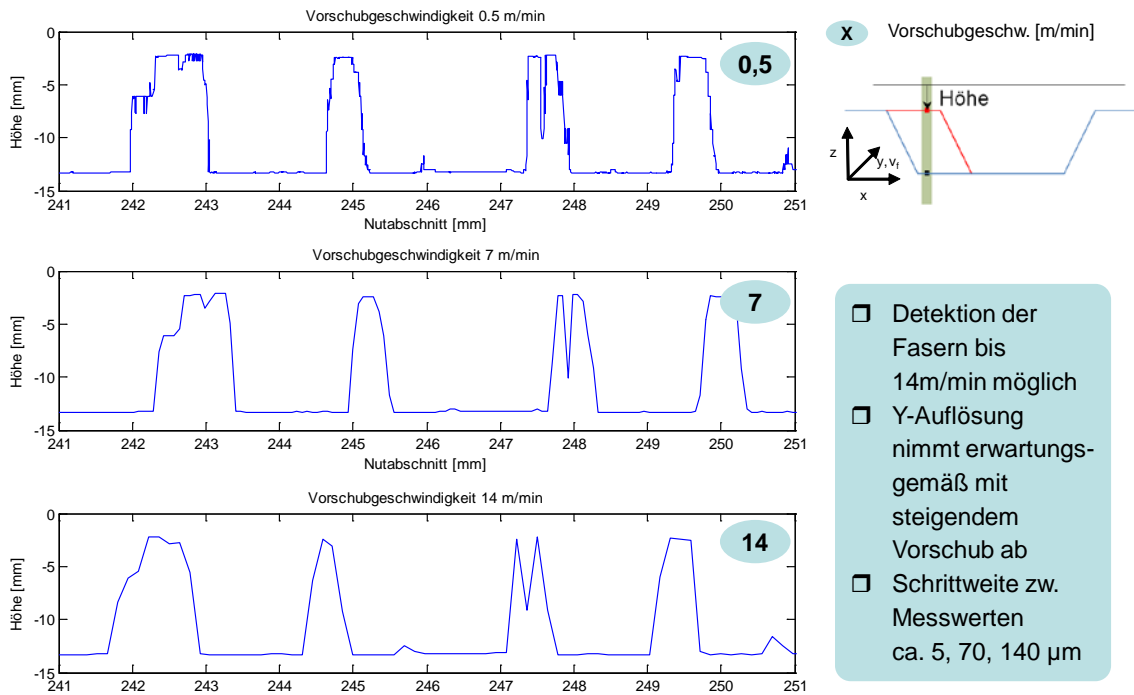


Abbildung 63: Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Vorschubgrenzen auf GFK

Die sichere Erfassung der Fasern ist beispielhaft in Abbildung 64 gezeigt. Dabei handelt es sich um den Ausschnitt einer Überlagerung des Messschriebs für die Ausgabe der Nutbreite mit einer Mikroskopaufnahme desselben Nutabschnitts. Die Überlagerung zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

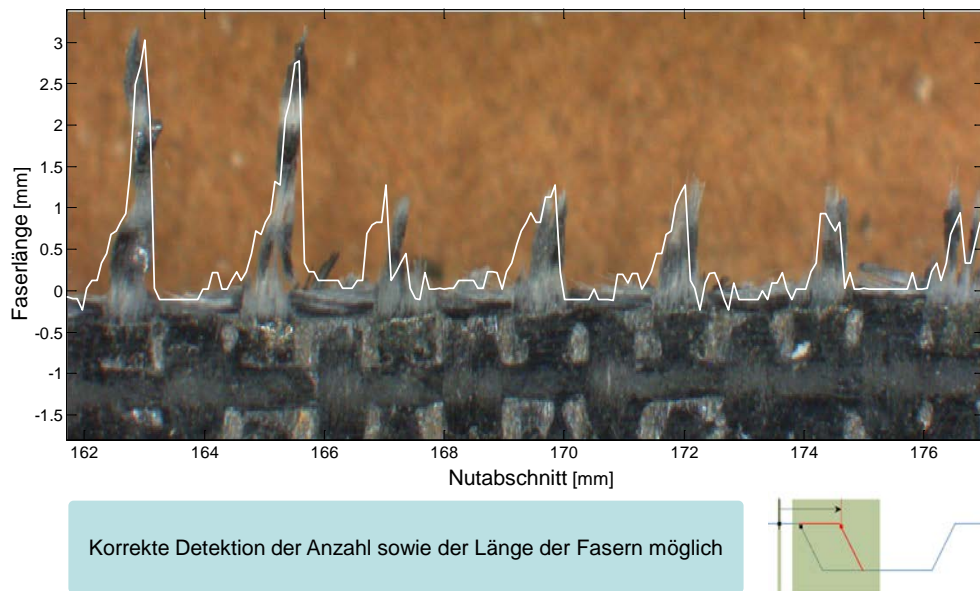


Abbildung 64: Detektion von Faserüberständen an CFK

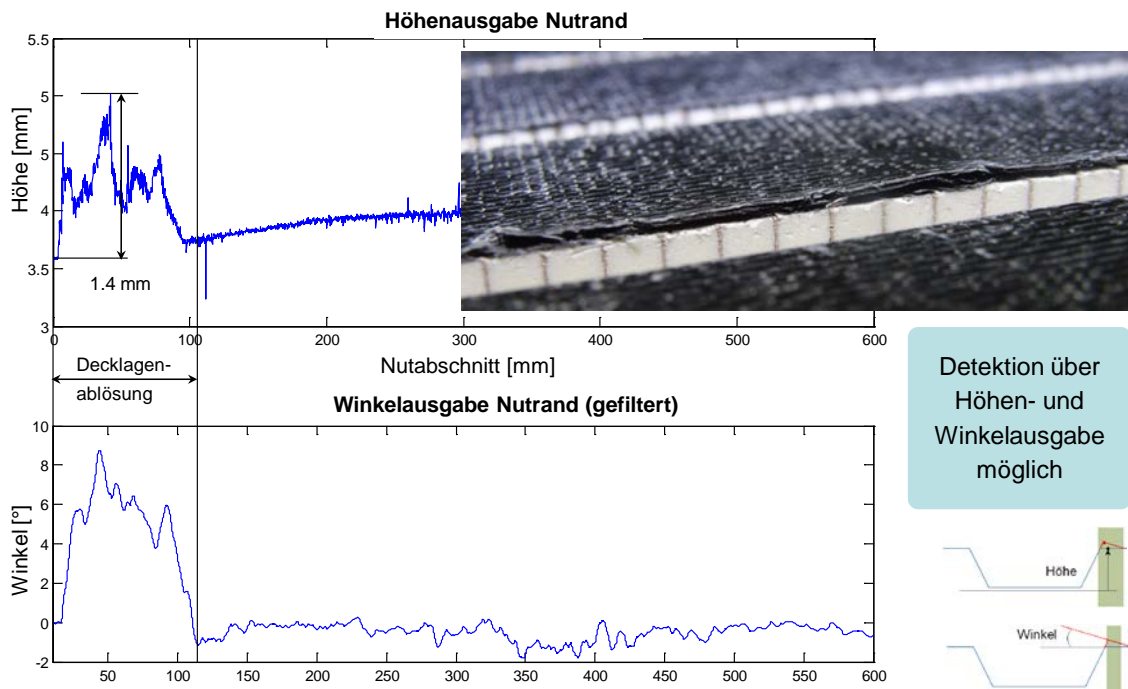


Abbildung 65: Höhen- und Winkelausgabe zur Detektion von Decklagenablösung

Decklagenablösungen wurden manuell erzeugt, wie sie im realen Produktionsprozess durch mangelnde Anbindung, Prozesskräfte oder schlecht abgeführte Späne entstehen können. Für die Erfassung wurden sowohl die Option Höhen- als auch Winkelausgabe genutzt. Die Darstellungen in Abbildung 65 zeigen die Höhenausgabe und eine geglättete Winkelausgabe. Beide sind grundsätzlich geeignet, um signifikante Decklagenablösungen im Millimeterbereich zu detektieren. Bei der Höhenausgabe zeigt sich deutlich ein Trend in der Messung durch eine geringfügige Wölbung der Platte auf der Aufspannung. Dieser Trend muss in einem Erfassungsalgorithmus kompensiert werden. Die Winkelausgabe zeigt diesen Trend nicht, weil sich die Messung immer auf die aktuelle Bauteilhöhe bezieht. Die hochfrequenten Schwankungen in der Winkelausgabe erfordern jedoch eine Tiefpassfilterung.

Mit der identischen Auswertungslogik wurden ebenfalls Versuche zur Detektion von Delamination an der Bauteilkante durchgeführt. Im Grundsatz unterscheiden sich Delamination und Decklagenablösung kaum, da sich bei Delamination einzelne Schichten des Decklagenverbunds durch ungünstige Fräskrafteinflüsse ablösen. Ergebnis der Versuche ist, dass Delamination nicht mittels Laserlinien zu erfassen ist. Der Grund dafür liegt in der elastischen Rückfederung der delaminierten Schichten, so dass sich keine geometrische Abweichung (Höhendifferenz) in detektierbarer Größenordnung ergibt.

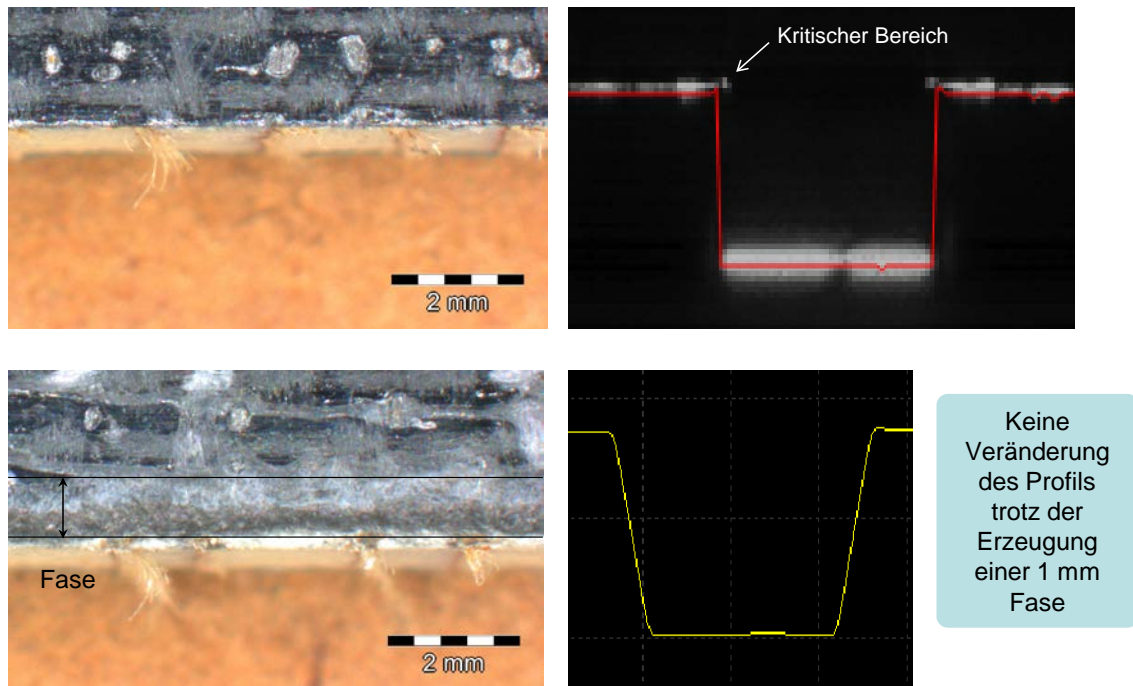


Abbildung 66: Erfassung der Kantengeometrie

Abbildung 66 zeigt die Ergebnisse zu Versuchen zur Erfassung der Kantengeometrie. Ziel der Erfassung ist festzustellen, ob an der erzeugten Kante eine ausreichende Verrundung oder ein Kantenbruch vorliegt. Dieser wird in der Größenordnung von 0,5 mm vorgeschrieben. Für die Versuche wurde manuell sukzessive eine Fase von bis zu 1 mm erzeugt, welche in den mikroskopischen Aufnahmen auf der linken Abbildungsseite zu sehen ist. Die obere Aufnahme zeigt die ungebogene, die untere eine um 1 mm gefasete Kante. In der rechten Hälfte sind die dazugehörigen Rohdaten aus dem Scanner dargestellt. Im oberen Bild die real vorliegende Reflexionsantwort der Nut und im unteren Bild die durch die Software berechnete Interpolation. Es wird deutlich, dass sich die Messstelle an der Kante im Bereich der stärksten Störeinflüsse durch ungewollte Reflexionen befindet. Die Abbildungen zeigen bereits optimierte Belichtungseinstellungen. Weiterhin hat ein Verkippen des Sensors um die y-Orientierung keine Verbesserung ergeben. Somit kann festgestellt werden, dass auch eine Kantengeometrieerfassung mittels Laserlinienscanner nicht möglich ist.

Zusammenfassend haben sich im Rahmen der Versuche zur Konfiguration eines Laserlinienscanners zur Erfassung von Merkmalen an der Bauteilkante folgende Erkenntnisse ergeben:

1. Faserüberstände
  - a. Angabe über Anzahl sowie Länge und Breite der Fasern für CFK und GFK möglich
  - b. Detektion von CFK-Fasern bei erforderlichen Vorschubgeschwindigkeiten möglich
2. Decklagenablösung
  - a. Detektion von Decklagenablösungen sowohl über Höhen- als auch über Winkelausgabe möglich



3. Delamination
  - a. Detektion von Delaminationen theoretisch sowohl über Höhen- als auch über Winkelausgabe möglich
  - b. Elastische Rückfederung der obersten Decklagenschicht problematisch
4. Kantengeometrie
  - a. Profillinie einer mit dem Qualitätsmerkmal versehenen Kante weist keine Unterschiede zu der einer ungebrochenen Kante auf
  - b. Eine korrekte Erfassung der Kantengeometrie ist nicht möglich

Im nächsten Schritt wurden geeignete Algorithmen für die prozesssichere Erfassung der detektierbaren Merkmale entworfen und das Messkonzept hinsichtlich der Integration in das Maschinenkonzept spezifiziert.

#### 6.2.3.4.4 AP3d4 – Erstellung Algorithmen

##### Temperaturüberwachung

Im Arbeitspaket wurde ein Algorithmus entwickelt, um aus den messbaren Temperaturen während der Zerspanung ein Prozessüberwachungskonzept zu erstellen. Die Grundidee des Konzeptes ist es, einen Punkt am Werkzeugschaft (Schafttemperatur,  $T_s$ ) für die Prozessüberwachung zu verwenden und durch den Algorithmus auf die Temperatur in der Zerspanungszone (Wirkstellentemperatur,  $T_{WS}$ ) zu extrapolieren, und so thermische Schädigung am Bauteil zu verhindern. In vorangegangenen Versuchen wurde gezeigt, dass das Temperaturprofil (vom Einspannpunkt bis zur Werkzeugspitze), eines an der Werkzeugspitze erhitzten Werkzeuges, durch eine Exponentialfunktion angenähert werden kann.

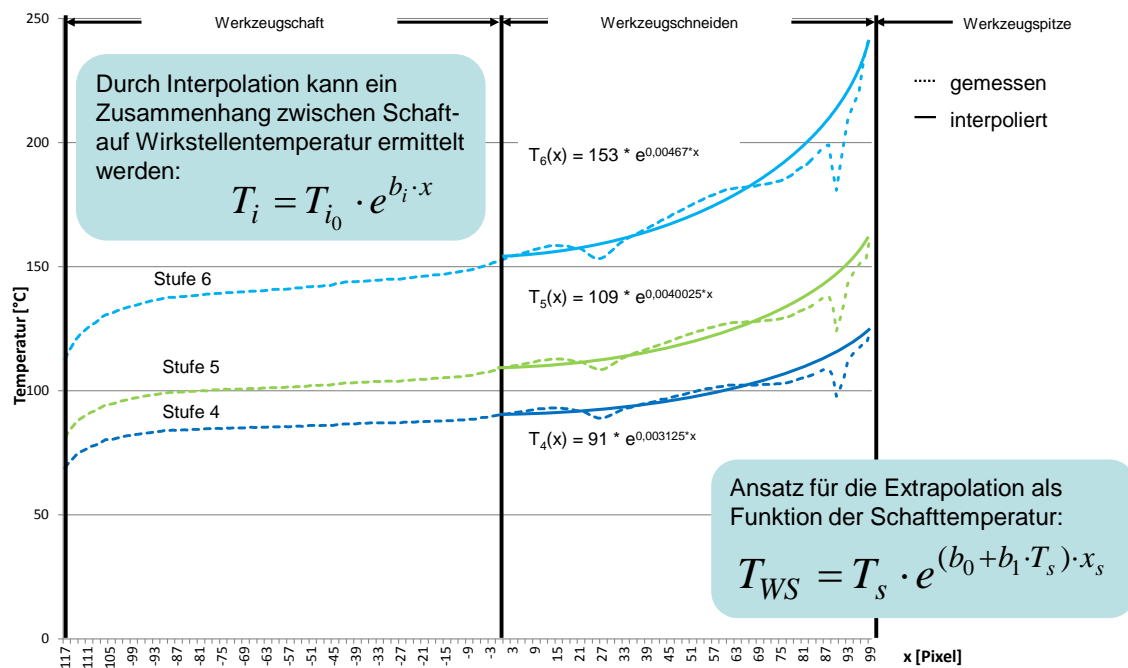


Abbildung 67: Extrapolationsansatz für die Prozessüberwachung

Für verschiedene Stufen der Heizplatte ist die Regressionsfunktion in Abbildung 67 angegeben. Sie folgt der Exponentialfunktion in der Form:

$$T_i = T_{i_0} \cdot e^{b_i \cdot x}$$

Da bei steigender Wirkstellentemperatur ( $T_{WS}$ ) auch die Schafttemperatur ( $T_s$ ) steigt, müssen für einen Ansatz zur Prozessüberwachung die Koeffizienten  $b_0$  und  $b_1$  in die Regressionsfunktion eingefügt werden:

$$T_{WS} = T_s \cdot e^{(b_0 + b_1 \cdot T_s) \cdot x_s}$$

Die Koeffizienten werden ermittelt, indem man die Ausgleichsgerade für die verschiedenen Temperaturniveaus, wie in Abbildung 68 beschrieben, bestimmt.

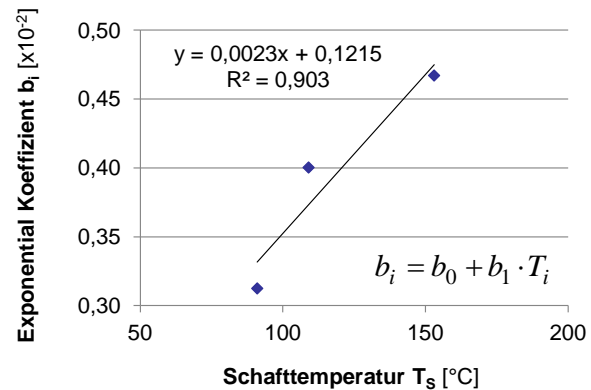
□ Ansatz:

$$T_{WS} = T_s \cdot e^{(b_0 + b_1 \cdot T_s) \cdot x_s}$$

□ Parameter

- Abstand Wirkstelle zu Schaftmesspunkt  $x_s$  ist bekannt
- Koeffizienten  $b_0$  und  $b_1$  für den Zusammenhang im Exponentialkoeffizienten

Bestimmung der Koeffizienten



Vereinfachung des allgemeingültigen Zusammenhangs durch Zusammenfassung der Koeffizienten:

$$T_{WS} = T_s \cdot e^{c_0 + c_1 \cdot T_s}$$

mit  $c_0 = b_0 \cdot x_s$  und  $c_1 = b_1 \cdot x_s$

Abbildung 68: Bestimmung der Ausgleichsgerade der Exponentialkoeffizienten

Im Diagramm ist der Exponentialkoeffizient für die verschiedenen Temperaturniveaus aufgetragen über die gemessene Schafttemperatur. Dieser Zusammenhang kann durch eine Ausgleichsgerade (Regressionsgerade) beschrieben werden. Die Koeffizienten  $b_0 \cdot x_s$  und  $b_1 \cdot x_s$  werden in den Koeffizienten  $c_0$  und  $c_1$  zusammengefasst, so dass man den vereinfachten Ansatz bekommt:

$$T_{WS} = T_s \cdot e^{c_0 + c_1 \cdot T_s}$$

Es kann nun für jede Prozesskombination die Temperatur an der Wirkstelle ( $T_{WS}$ ) bestimmt werden und ein Abgleich stattfinden, ob die jeweilige Schädigungstemperatur des Materials überschritten wird. Eine Prozesskombination ist charakterisiert durch den zerspannten Werkstoff, Werkzeug, Eingriffsverhältnis und Prozessparameter.

Der Algorithmus wurde in einem Gesamtkonzept zusammengefasst. Das Konzept ist in Abbildung 69 dargestellt. Es sind exemplarisch die Temperaturverläufe für die Zerspaltung von gefülltem Sandwichmaterial gezeigt. Es sind der Temperaturverlauf aus der Simulation (blau, Ergebnis aus AP3a4), der Messung während der Zerspaltung (grün) und eine beispielhafte Grenztemperatur für thermische Schädigung (rot) abgebildet. Die blaue Kurve entspricht der Werkzeugschafttemperatur aus der Simulation im Abstand 27 mm



von der Werkzeugspitze, also am selben Punkt, an dem während des Versuchs die Werkzeugschafttemperatur (grün) gemessen wurde. Beide Kurven streben einem stationären Wert von ca. 130°C entgegen. Im Bereich I der Abbildung ist der Prozess thermisch instationär, d.h. es vergeht eine Totzeit, bis die Prozesswärme den Messpunkt erreicht, also sich das Werkzeug selbst erwärmt hat (Nau, 2004). Dieser Effekt ist bei Widerstandsthermometern zu beobachten, welche sich ab Messbeginn zunächst aufheizen bis die Messgröße die Messstelle erreicht (Profos & Pfeifer, 1994). Eine Prozessüberwachung in Bereich I ist durch zeitabschnittsweises Bilden des Gradienten (der Steigung) möglich. Die Steigung der Messwerte darf die Steigung der Grenzkurve (hier rot) nicht überschreiten, da dies zwangsläufig zu einer Überschreitung der Schädigungstemperatur (der stationären Grenzkurve im Bereich II, rot) führen würde. Im Bereich II wird der Zerspanprozess näherungsweise als thermisch stationär angesehen. In dem Bereich muss die Werkzeugschafttemperatur (grün) unter der Grenzkurve für thermische Schädigung (rot) liegen.

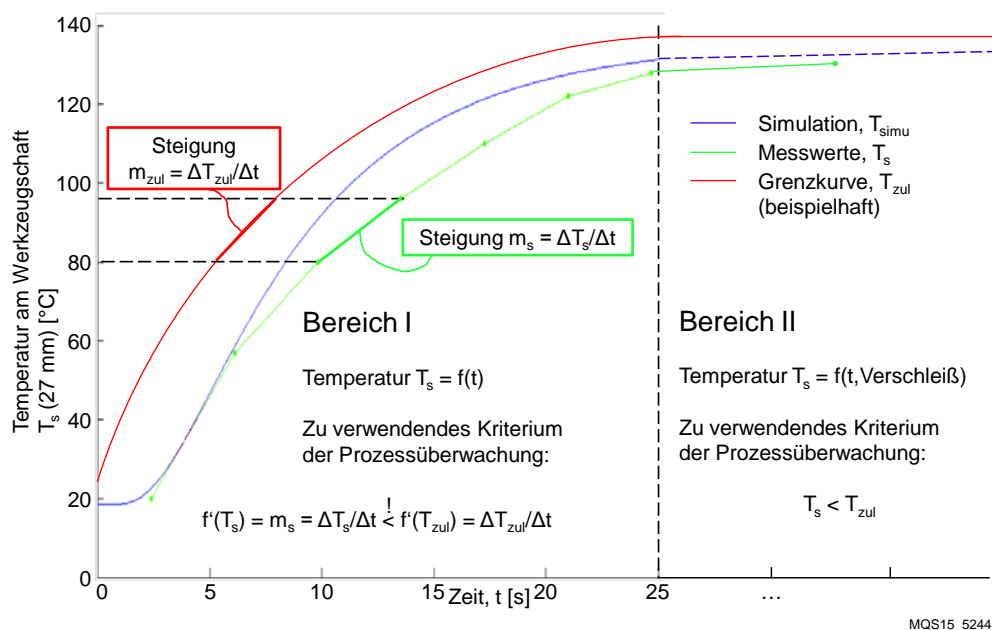


Abbildung 69: Ergebnis aus Simulation und Messung der Werkzeugschafttemperatur

### Fräskantenüberwachung

Aus den Ergebnissen AP3d3 zur *Sensorentwicklung und -auslegung* ergibt sich, dass eine Detektion von Faserüberständen und Decklagenablösungen unter geeigneten Rahmenbedingungen möglich ist. Bei Decklagenablösungen handelt es sich um eine selten auftretende Fehler- bzw. Ausschussursache. Zudem ergeben sich aus der Detektion im Prozess keine direkten Gegenmaßnahmen, da die grundlegende Ursache für eine Ablösung im Pressprozess liegt. Somit bleiben einzig die Faserbündelüberstände als zentrales Überwachungsmerkmal im Prozess. In den Vorversuchen wurde dazu festgestellt, dass eine korrekte Erfassung des Merkmals nur bei Spanfreiheit der Nut und des Raums zwischen Sensor und Nut gewährleistet werden kann.

Ziel des Unterarbeitspakets *Erstellung Algorithmen* für die Fräskantenüberwachung ist die Erfassung einer Kenngröße für Faserüberstände, welche entweder in zyklischen Abstän-

den geprüft werden kann oder direkt in den Maschinenregelkreis integriert ist. Dazu wird die dimensionslose Kennzahl Faserdichte  $\alpha$  wie folgt festgelegt:

$$\alpha = \frac{1}{l_{\text{Nut}}} \sum_{i=1}^n d_{i_{\text{Faser}}}$$

Wie in Abbildung 70 dargestellt, werden bei der Kennzahl die Breiten der Faserbündelüberstände  $d_{i_{\text{Faser}}}$  in einem Bereich auf die Länge des Bereichs  $l_{\text{Nut}}$  bezogen. Dabei werden ausschließlich Faserbündel berücksichtigt, die eine Länge oberhalb eines festzulegenden Schwellwerts besitzen. Der Bereich, welcher zu Grunde gelegt wird, ist bei einer Erfassung im Prozess rollierend in einer geeigneten Länge zu wählen.

Abbildung 70 zeigt schematisch die Wahl eines geeigneten Schwellwerts. Der Sensor ist grob an der Nut ausgerichtet, so dass die Kante einer einwandfreien Nut einer Faserlänge von ungefähr Null entspricht. Wählt man nun einen Schwellwert von z.B. 0,5 mm, kann durch die Analyse des Faserlängenverlaufs mittels einen Algorithmus' ermittelt werden, wie breit die einzelnen Fasern oberhalb des Schwellwerts sind.

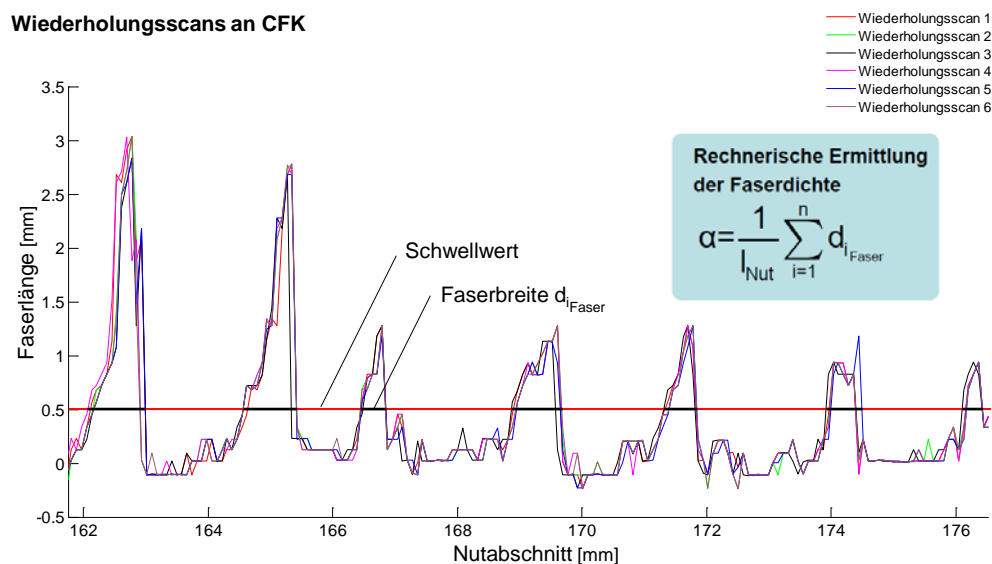
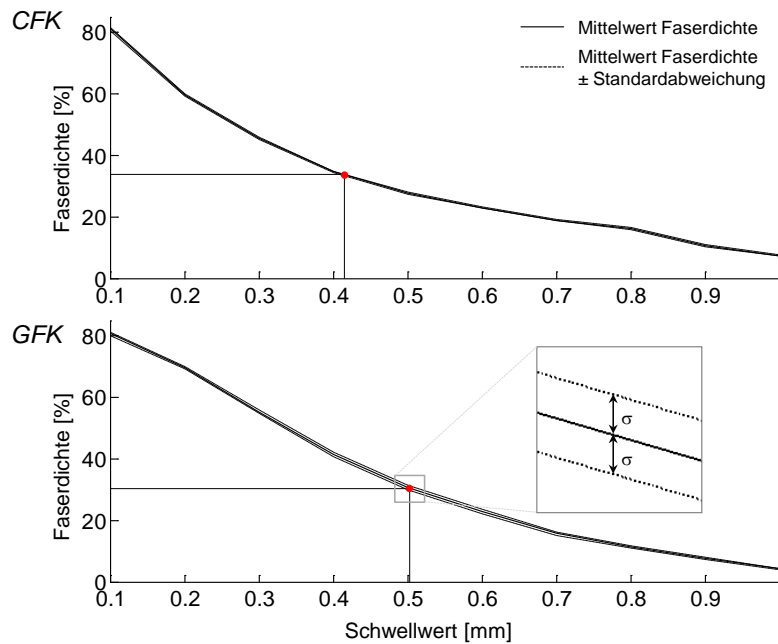


Abbildung 70: Prinzip zur rechnerischen Ermittlung der Faserdichte

Zur Absicherung des automatisierten Detektionsverfahrens wurden sowohl für CFK- als auch GFK-Materialien jeweils 6 Wiederholungsscans desselben Nutabschnitts durchgeführt und daraus mittels des entwickelten Algorithmus' in Matlab die Faserdichte bestimmt. Abbildung 71 zeigt jeweils die mittlere Faserdichte aus den Wiederholungsmessungen für ein CFK- und GFK-Material. Diese ist über den gewählten Schwellwert aufgetragen. Wie aus der Fasergeometrie und den Messschrieben zu erwarten, sinkt die ermittelte Faserdichte mit steigendem Schwellwert. Die Breite der Faserbündel nimmt mit zunehmendem Abstand zur Nutkante ab – zudem werden kürzere Fasern nicht mehr erfasst.

**Mittlere Faserdichte  $\alpha$  aus Wiederholungsmessungen****Mikroskopische Auswertung der realen Faserdichten**

$$\alpha_{\text{CFK}} = 30.3\%$$

$$\alpha_{\text{GFK}} = 34.1\%$$

**Schwankungsbreite der Wiederholungsmessungen**

$$\sigma_{\alpha_{\text{CFK}}} = 0.21\%$$

$$\sigma_{\alpha_{\text{GFK}}} = 0.75\%$$

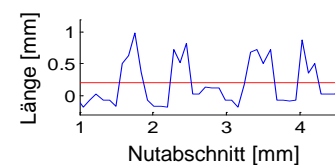
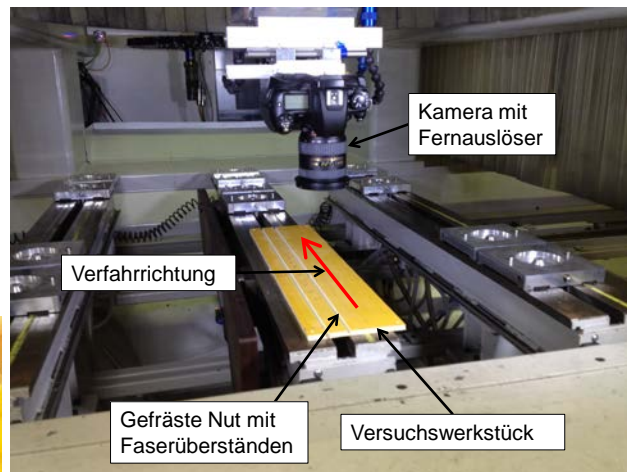
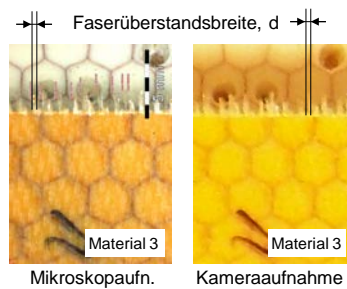


Abbildung 71: Faserdichte in Abhängigkeit vom Schwellwert für Wiederholungsmessungen

Weiterhin wurde zur Absicherung des Detektionsprinzips die reale Faserdichte für die verwendeten Proben unter dem Mikroskop mittels manuell vermessen. Diese wurde mit 30,3 % für CFK bzw. 34,1 % für GFK bestimmt. Diese manuelle Auswertung lässt einen Rückschluss auf die Größe eines geeigneten Schwellwerts zu, welche jedoch abhängig vom Material und der Sensormontage ist. Wertet man die Scans für den ermittelten Schwellwert aus, so ergibt sich die Schwankungsbreite (Standardabweichung) für die Detektionsgröße bei den Wiederholungsmessungen. Diese liegt bei den untersuchten Materialien bei 0,21 % für CFK bzw. 0,75 % für GFK. Die größere Schwankungsbreite für GFK-Materialien lässt sich durch die teilweise transparenten Faserbündel und die dadurch schwierigere Erfassung erklären. Beide Schwankungsbreiten lassen eine sichere Erfassung zu.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Prozessüberwachung mittels Laserscanner durch die am Markt erhältlichen Messgeräte und deren Abstraten begrenzt ist. Ein weiteres Problem ist die entstehende Datenmenge, die das Prozessüberwachungssystem verarbeiten muss. Eine Alternative stellt ein Konzept zur visuellen Prozessüberwachung durch den Maschinenbediener dar. Mittels Einzelbildern, die periodisch von der bearbeiteten Oberfläche aufgenommen werden, kann der Bediener korrigierend eingreifen und Prozessunregelmäßigkeiten zeitnah erkennen. Die Kamera wird im Rahmen der Düsenachführung hinter dem Werkzeug geführt. Das Konzept zeigt Abbildung 72.

- Fotografische Aufnahme der Kanten einer gefrästen Nut eines Bauteils mittels einer Kamera
- Material 1 und 3
- 3 Belichtungszeiten  $t_{\text{Belichtung}}$ 
  - 1/1000 s, 1/2000, 1/4000
- 3 Vorschubgeschwindigkeiten  $v_f$
- Messung der Faserüberstands-  
breite
- Vergleich mit tatsächlichen  
Faserüberstandsbreiten bei  
mikroskopischer Auswertung



MQS15\_5247

Abbildung 72: Prozessüberwachungskonzept zur Detektion von Faserüberständen

Da die Einzelbilder online während des Prozesses aufgenommen werden, ist es wichtig, die Tauglichkeit hinsichtlich Bewegungsunschärfe und Auflösung in Bewegungsrichtung zu bestimmen. Die minimale Faserüberstandsbreite  $d$  wurde mit  $200 \mu\text{m}$  angenommen, da dies die kleinste in Messungen ermittelte Faserüberstandsbreite ist. Zusätzlich wurde ein Sicherheitsfaktor  $S$  von 2 berücksichtigt. Die Auflösung in Vorschubrichtung  $\Delta y$  wird durch

$$\Delta y = \frac{d}{S} = \frac{200 \mu\text{m}}{2} = 0,1 \text{ mm}$$

angegeben. Die nötige Belichtungszeit  $t_{\text{Belichtung}}$  bei einer Auflösung  $\Delta y$  von  $0,1 \text{ mm}$  ergibt sich durch

$$t_{\text{Belichtung}} = \frac{\Delta y}{v_f}$$

bestimmt. Die Tauglichkeit und Implementierbarkeit konnte in AP3d6 gezeigt und auf Laborebene verifiziert werden.

#### 6.2.3.4.5 AP3d5 – Integration in das Maschinenkonzept

Die Recherchen zum Stand der Technik haben bestätigt, dass am Markt keine direkt verfügbaren oder unmittelbar implementierbaren Lösungen für die Überwachung von Qualitätskriterien bei der spanenden Bearbeitung von Sandwichmaterialien existieren. Die weitergehenden Recherchen zu Detektionsmöglichkeiten und die genauere Spezifikation der Überwachungskriterien und -notwendigkeiten zeigten, dass es technisch möglich ist, eine Temperaturüberwachung am Fräserschaft sowie eine Bauteilkantenkontrolle zu entwickeln. Voruntersuchungen und Konzeptentwicklungen zur Überwachung bestätigten diese Einschätzung und zeigten die Einschränkungen für die industrielle Anwendbarkeit auf.

Der primäre Fokus des Projekts liegt auf der Erhöhung der Prozesssicherheit hinsichtlich Bearbeitungsqualität. Die Komplexität der Bearbeitungsmaschine erhöht sich erheblich, um beispielsweise eine zweiseitige Bearbeitung mit automatisiertem Wenden der Bauteile zu ermöglichen. Jedoch tragen diese und weitere Neuentwicklungen im Rahmen des Ma-

schinenkonzepts maßgeblich zur Prozesssicherheit sowie Bearbeitungsqualität bei. Beispielsweise kann bei der zweiseitigen Bearbeitung die lokale Belastung des Fräuserschneiden im Bereich der Decklagen durch eine axiale Oszillation deutlich gesenkt werden. Verschleiß und damit einhergehende Temperaturentwicklung sowie mögliche Delamination können somit verringert werden. Diese Erkenntnisse fließen bereits jetzt in die Neuprogrammierung der CNC-Software ein. Zusätzlich eröffnet die zweiseitige Bearbeitungsstrategie unter bestimmten Voraussetzungen die Möglichkeit zum Einsatz der entwickelten Sägetechnologie, welche herausragende Standzeiten mit hervorragenden Kantenqualitäten vereint. Ein Temperaturanstieg ist dabei kaum zu detektieren. In der Summe liegt damit ein Konzept mit deutlich erhöhter Prozesssicherheit vor, das nicht mehr zwingend eine kontinuierliche Prozessüberwachung benötigt. Zudem ist bei jetzigem Stand der Temperaturüberwachung die Werkzeugkühlung mittels Blasdüse noch nicht berücksichtigt. Ein kritischer Spänestau und damit ein Anstieg der Prozesstemperatur kann verhindert werden, so dass eine thermische Schädigung durch diese Prozessgestaltung ausgeschlossen werden kann.

Daher werden auf Grund der Komplexität des Maschinendemonstrators im ersten Schritt auf industrieller Ebene lediglich Bauraum und Anschlussmöglichkeiten für die Sensorik vorgesehen. Die Messkonzepte, das Prinzip der Erfassung und die Algorithmen wurden in diesem Arbeitspaket auf Laborebene vollständig entwickelt, an der Versuchsmaschine des IPMT für das industrielle Umfeld getestet und können bei Bedarf nachträglich in eine industrielle Lösung implementiert werden. Eine Nachrüstung der entwickelten Überwachungssysteme kann jederzeit vorgenommen werden.

Auf Einzelaspekte der Entscheidungen über die Zurückstellung der Integration wird im Folgenden eingegangen.

#### Temperaturüberwachung

Für eine Integration des Prozessüberwachungskonzeptes der Temperatur in das Gesamtkonzept ist der Bauraum des Sensors in der Absaughaube vorgesehen. Die Überwachung findet am Werkzeugschaft statt. Die Kommunikation der Prozessüberwachungseinheit mit dem Sensor geschieht über eine Kabelverbindung, welche ebenfalls im Gesamtkonzept vorgesehen ist. Vorteilhaft ist eine Überwachung am Werkzeugschaft mit Blickrichtung entgegengesetzt der Vorschubrichtung. Es kann so verhindert werden, dass Späne zwischen den Sensor und die Messstelle geraten. Baulich kann dies zum Beispiel gemeinsam mit der implementierten Blasdüsennachführung geschehen. Das verwendete Messgerät verfügt über analoge Ein- und Ausgänge, über die, beispielsweise durch das CNC-Programm, die Grenztemperatur an der Messstelle und der Emissionsgrad des Werkzeugs übergeben werden können. Auch eine Warnung bei Überschreiten der Schädigungsgrenztemperatur kann über diese Schnittstelle ausgegeben werden.

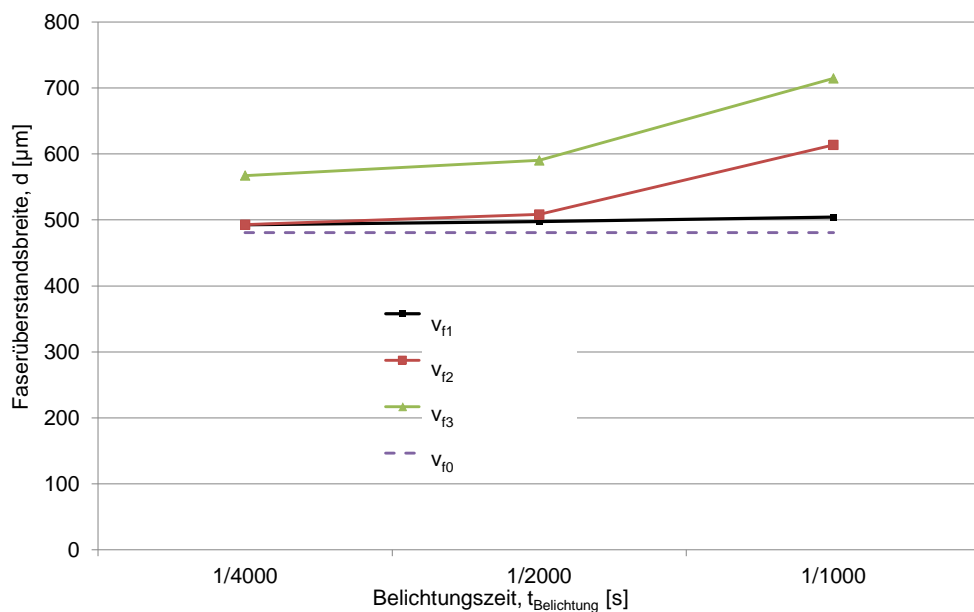
#### Fräskantenüberwachung

Die vorgestellte Prozessüberwachung der Fräskante mittels Kamera kann an der Spindel zusammen mit der Blasdüse nachgeführt werden. Das Prinzip der Prozessüberwachung mittels Einzelbildern einer Kamera ermöglicht dem Bediener einen direkten Blick auf den Zerspanprozess und die erzeugte Bauteilkante sowie einen unmittelbaren Eingriff bei Prozessstörungen.

Ziel der Fräskantenüberwachung ist es während der Bearbeitung anhand von Qualitätsmerkmalen an der Bauteilkante Rückschlüsse auf den Prozess zu ermöglichen. Das gehäufte Auftreten von Faserbündelüberständen kann beispielsweise ein Anzeichen für zunehmenden Verschleiß an der Werkzeugschneide sein. Kommt es durch weiter steigenden Verschleiß zu einer Erhöhung der Prozesstemperatur, kann dies zum Auftreten von Delamination führen.

#### 6.2.3.4.6 AP3d6 – Erprobung Überwachungskonzept

Zur Erprobung des visuellen Überwachungskonzeptes hinsichtlich Faserüberständen an der Bearbeitungskante wurde ein Bauteil mit Faserüberständen mit verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten überfahren und dabei Einzelbilder mit unterschiedlichen Belichtungszeiten aufgenommen. Abbildung 73 zeigt die gemittelte Faserüberstandsbreite in Abhängigkeit der Belichtungszeit bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten und statischen Einzelbildern (lila). Zur Bestimmung der gemittelten Faserüberstandsbreite wurden die Faserüberstandsbreiten desselben Abschnitts der Bauteilkante, aus den Einzelbildern für verschiedene Belichtungszeiten und Vorschubgeschwindigkeiten, gemittelt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Belichtungszeit die gemittelte Faserüberstandsbreite, d.h. die Bewegungsunschärfe zunimmt. Der gleiche Verlauf ist auch bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit zu beobachten.



MOS15\_5249

Abbildung 73: Gemittelten Faserüberstandsbreiten in Abhängigkeit von Belichtungszeit und Vorschubgeschwindigkeit

Insgesamt konnte anhand des dargestellten Beispiels gezeigt werden, dass bei einer Belichtungszeit kleiner  $1/4000$  Sekunde die Faserbündelbreite ausreichend genau bestimmt werden kann.

#### **6.2.4 AP4 – Online QS**

Das Arbeitspaket 4 zur Online QS war nicht Bestandteil des geförderten Vorhabens und wird/wurde bilateral zwischen EFW und IPMT berichtet.

### 6.3 Zusammenfassende Gegenüberstellung von Zielen und Ergebnissen

Die beantragten, vorgegebenen Ziele waren:

1. Steigerung der Qualität
2. Verkürzung der Durchlaufzeit
3. Erhöhung des Automatisierungsgrades

Eine **Steigerung der Qualität** wird durch folgende Maßnahmen erreicht:

- Durch Verbesserung der Spanabfuhr wird Nacharbeit vermieden und Späne können nicht mehr zu Decklagenablösung, Delamination oder Spannproblemen führen
- Durch einen automatisierten Entgratschritt der Maschine werden restliche Faserüberstände und Delaminationen entfernt.
- Durch die Prozessüberwachung hinsichtlich Faserüberständen wird eine Bauteilschädigung frühzeitig erkannt.
- Die Qualität der zur Einmessung nötigen Absteckbohrungen wurde erheblich gesteigert und ist nun automatisiert möglich.

Die **Durchlaufzeit** kann durch folgende Maßnahmen verkürzt werden:

- Durch die automatisierte Bauteilvermessung kann eine Einmessung hauptzeitparallel durchgeführt werden.
- Der manuelle Nacharbeitsaufwand durch Putzen und Entgraten der vereinzelt Bauteile entfällt durch den automatisierten Entgratschritt und das Absaug-Blasdüsen-Konzept.
- Das Sägen von geraden Bauteilkanten kann die Bearbeitungszeit senken und die Wirtschaftlichkeit erhöhen.

Der **Automatisierungsgrad** wurde in folgenden Bereichen erhöht:

- Die Bauteilvermessung findet automatisiert statt
- Automatisierte Einmessung von Bauteilen
- Anbindungsstege können entfallen

Im Detail wurden zur Erreichung des Gesamtziels operative Projektarbeitsziele formuliert. Tabelle 5 listet diese und stellt sie dem Status zum Abschluss des Projektes gegenüber.



Tabelle 5: Vergleich der Projektarbeitsziele mit den erreichten Status

<b>Arbeitsziele</b>	<b>Status in den Arbeitspaketen des IPMT zu Projektabschluss</b>
→ Verfahrensentwicklung zur automatisierten Lageerkennung der Bauteile in der Masterplatte für toleranzoptimierte Bauteilbearbeitung	Demonstrationsaufbau hardwareseitig und Algorithmen zur Automatisierung erfolgreich und abschließend getestet. Umsetzung durch EFW im Gesamtanlagendemonstrator.
→ Automatische Bauteilverarbeitung über integrierte Bauteilerkennung, Laden von Bearbeitungsprogrammen und Bauteildokumentation	Schnittstelle zwischen Bauteilvermessung und Optimierung der NC-Programme festgelegt und in der Umsetzung befindlich.
→ Parallelisieren von Prozessschritten (insbes. Messen/Prüfen und mechanische Bearbeitung)	Maschinenkonzept und Prozesslayout entworfen und in der Umsetzung
→ Entwicklung eines intelligenten, rüsfreien Spannkonzpts	Konzept zur beidseitigen, rüsfreien Bearbeitung erfolgreich hinsichtlich des Umspannens getestet und in der Umsetzung, sowie Werkzeuge und Prozesse auf die geänderten Anforderungen ausgelegt und verifiziert
→ Hochpräzise, delaminations- und gratfreie Bearbeitung mit thermisch ungeschädigten Bauteilkanten	Entsprechende Maßnahmen und Möglichkeiten sind durch die Wahl des Bearbeitungsprozesses und in den Konzepten der Prozessüberwachung berücksichtigt.
→ Energieeffiziente Absaugung und Kühlung	Absaug/Kühl-Kombination entwickelt: Energieeinsparpotential von ca. 75 % bei spannfreier Nut und erhöhtem Absaugeffekt
→ Entwicklung einer materialspezifischen Prozessüberwachung zur Sicherstellung der angestrebten Qualitätssteigerung bzw. Vermeidung von Nacharbeit und Ausschuss	Konzepte zur Prozessüberwachung erarbeitet und getestet. Vertiefung von Werkzeugschafttemperaturmessung für variable Werkzeugeingriffszeiten und Fräskantenüberwachung durchgeführt sowie Konzept der visuellen Überwachung mittels Kamera ergänzt.
→ Entwicklung eines NDT-Verfahrens zur automatisierten 100%-Prüfung der Bauteilkanten	Kantenüberwachung konzipiert und getestet. Erfassung von Delamination und Kantengeometrie mittels Linienscanner kritisch, Faserüberstände und Decklagenablösung möglich.
→ Kompetenzaufbau bei der Gestaltung von Fertigungssystemen zur Automatisierung sowie Parallelisieren von Inspektions- und Bearbeitungsprozessen zur Fertigung von Sandwichbauteilen	Sowohl bei Einzeltechnologien als auch im Gesamtkonzept konnte im bisherigen Projektverlauf durch enge Zusammenarbeit und Diskussion des Layouts umfangreiches, anwendungsorientiertes Wissen aufgebaut werden.
→ Erstellung von Algorithmen zur Auswertung von qualitätsbezogenen Messdaten sowie Aufbau eines übergeordneten qualitätsbezogenen Wissensmanagements	Umfassendes Konzept im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit entworfen und bei EFW implementiert.

Es kann ein positives Fazit gezogen werden, da alle zu Projektbeginn und im Vorhaben gesetzten Ziele erreicht werden konnten. Die Ausgaben- und Zeitplanung konnte eingehalten werden. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind im folgenden Abschnitt angegeben.

## 7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Eine Aufstellung über die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ist in Abbildung 74 dargestellt. Den Hauptanteil bilden die Personalkosten, gefolgt von den Kosten für Dienstreisen und Kosten für die Anschaffung von Gegenständen, welche für das Projekt benötigt wurden.

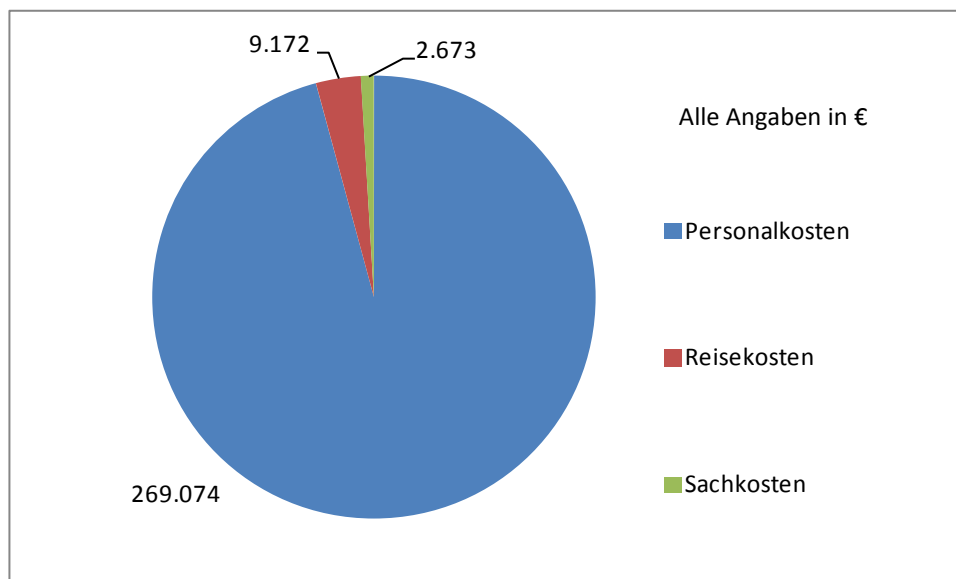


Abbildung 74: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

## **8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geleisteten Arbeiten und die dafür aufgewendeten Mittel waren notwendig und angemessen. Sie wurden gemäß dem beantragten Zeitplan bearbeitet und alle gesetzten Ziele konnten erreicht werden. Die Mittelabrufung erfolgte fristgerecht und es mussten keine Zusatzmittel aufgewendet werden.

## **9 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Das IPMT hat bei seiner FuE-Tätigkeit stets den Gesamtprozess und die Prozesskette im Blick und vermag es nicht nur Teilaspekte zu beleuchten, sondern diese auch in einem Gesamtkonzept zu wirtschaftlich nutzbaren Lösungen zu führen. Insbesondere können Lösungen, welche sich im Kontext der Sandwichverarbeitung als nicht zielführend erwiesen haben für andere Fragestellungen Vorteile bieten und so auf die erarbeiteten Ergebnisse aufgebaut werden. Auf dem Gebiet des Trennschleifens und Vorritzens beispielsweise gibt es derzeit intensive Bemühungen die gewonnenen Ergebnisse zu nutzen und in Forschungsprojekten genauer zu betrachten. Das erarbeitete Wissen und die Ergebnisse können am Institut weiter genutzt werden und tragen zum Know-How des Instituts auf dem Gebiet der Messtechnik in der Fertigung und der Fertigungstechnik von Faserverbund-Werkstoffen bei. Teilergebnisse münden in wissenschaftliche Veröffentlichungen und tragen zum hohen wissenschaftlichen Niveau deutscher Forschungsinstitute bei. Die Durchführung des Vorhabens und die erzielten Ergebnisse machen das IPMT zu einem attraktiven Partner für die Industrie auch über die Luftfahrtindustrie hinaus. Viele der erzielten Ergebnisse zur Automatisierung von Fertigungsprozessen und deren Auslegung können auf die Automobilindustrie übertragen werden. Hauptaugenmerk liegt für das IPMT auf der Festigung von bestehenden und Schließung neuer Industriepartnerschaften.

Zahlreiche Teilergebnisse sind in das Maschinenkonzept eingeflossen und werden im Rahmen einer Verwertung umgesetzt. Zu diesen Teilergebnissen gehören:

1. Automatische Bauteilvermessung und Lagekorrektur
2. Absaug-Blasdüsenkonzept
3. Werkzeugbeschichtungskonzept
4. Bohrkonzent für Absteckbohrungen
5. Optimierte Frästechnologie
6. Optische Prozessüberwachung

Das erarbeitete Know-How auf dem Gebiet des Trennschleifens ist derzeit Gegenstand verschiedenster Untersuchungen und wird auch in Zukunft weiter bearbeitet werden. Im Rahmen von Förderprogrammen werden Vorhaben beantragt, welche auf die gewonnenen Ergebnisse aufbauen mit dem Ziel, diese wirtschaftlich nutzbar zu machen. Eine Weiterverwendung der Ergebnisse ist in diversen Vorhaben geplant.

Hinsichtlich der Wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit hat das IPMT den Stand der Technik durch die Veröffentlichungen zu den Themen „Inspektion innerer Strukturen mittels Thermografie“ und zum „Vorritzen von Faserverbund-Strukturen“ entscheidend weiterentwickelt und gezeigt, dass es führend ist auf dem Gebiet der Faserverbund-Werkstoff-Verarbeitung und Prozessauslegung.

## **10 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Der Stand der Technik und Wissenschaft wurde zu Beginn des Vorhabens intensiv aufgearbeitet und dokumentiert sowie während der Projektlaufzeit fortlaufend aktualisiert. Derzeit ist kein Fortschritt anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt. Das Ergebnis der Recherche befindet sich in Abschnitt 4 - Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.

## 11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Vorhabens sind folgende Veröffentlichungen erfolgt:

- ➔ Griefahn, D.; Wollnack, J.; Hintze, W.:  
**Principal component analysis for fast and automated thermographic inspection of internal structures in sandwich parts** in: Journal of Sensors and Sensor Systems, 3, pp. 105-111, 2014 doi:10.5194/jsss-3-105-2014
- ➔ Geis, T.; Klingelhöller, C.; Hintze, W.:  
**Constant Depth Scoring of Fibre Reinforced Plastic Structures to Prevent Delamination** in: Procedia of the 6<sup>th</sup> CIRP International Conference on High Performance Cutting (HPC2014), Elsevier, Vol. 14, 2014, S. 205-210 doi:10.1016/j.procir.2014.03.103 (Diese Publikation wurde bereits im jüngsten CIRP-Keynote-Paper zitiert:  
Klocke, F. et al.:  
**Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites** in: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Elsevier, Vol. 64, 2015, S. 581-604 doi:10.1016/j.cirp.2015.05.004)

Geplante Veröffentlichungen sind:

- ➔ Dieser Schlussbericht wird gem. Ziff. 11.6 NKBF 98 mit der Technischen Informationsbibliothek (TIB) in Hannover veröffentlicht.

## Literaturverzeichnis

Boquete, L., Ortega, S., Miguel-Jiménez, J. M., Rodríguez-Ascariz, J. M., & Blanco, R. (2012). Automated Detection of Breast Cancer in Thermal Infrared Images, Based on Independent Component Analysis. *Journal of Medical Systems*, 36 (1), S. 103-111.

Bratukhin, A., & Bogolyubov, V. (1995). *Composite Manufacturing Technology*. Springer Netherlands.

Chen, J. C. (2007). Crack growth induced by sonic IR inspection. *Nondestructive testing and evaluation*, 22 (2-3), S. 83.

Composite Technology Center GmbH Stade. Verstärkte Schaumkernverbunde als Zukunft für Flugzeug - Primärstrukturen? In CFK-Valley.

Fawaz, Z., & Armstrong, C. (2001). Infrared Thermography as a rapid NDI tool for advanced composite materials. In S. V. Hoa, *Design, manufacturing & application of composites*. Lancaster: Technomic Publ. Co.

Fritz, A. H., & Schulze, G. (2004). *Fertigungstechnik*. Springer.

Godding, R. (2006). Camera Calibration. In A. Hornberg, *Handbook of machine vision*. Weinheim: Wiley-VCH.

Hähnel, F., Wolf, K., Hauffe, A., Alekseev, K. A., & Zakirov, I. M. (2011). Wedge-shaped folded sandwich cores for aircraft applications: from design and manufacturing process to experimental structure validation. *CEAS Aeronautical Journal*, 2 (1-4), S. 203-212.

Hillger, W., & Gebhardt, W. (1999). Bildgebende Ultraschallprüfung an CFK-Probekörpern mit Ankopplung über Luft. In DGZfP, *10 Jahre Vereinigung der ZfP in Deutschland*. Berlin: DGZfP.

Hintze, W., Hartmann, D., & Schütte, C. (2011). Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study. *Composites Science and Technology*, 71 (15), S. 1719-1726.

Institutes für Holz- und Papiertechnik. (2011). Abgerufen am 13. 7 2012 von Tätigkeitsbericht 2010/2011: [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/fakultaet\\_maschinenwesen/ihp/hft/news/tb2011](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ihp/hft/news/tb2011)

Jain, V. K. (2008). Advanced (Non-traditional) Machining Processes. In J. P. Davim, *Machining* (Bd. 11). London: Springer-Verlag.

Jüngert, A. (2010). *Untersuchung von GFK-Bauteilen mit akustischen Verfahren am Beispiel der Rotorblätter von Windenergieanlagen*. Stuttgart: Univ.

Kunststoff Web. (2012). Abgerufen am 13. 7 2012 von Laserschneiden von CFK-Bauteilen schneller und besser als spanende Verfahren: [http://www.kunststoffweb.de/neueprodukte/Laserschneiden\\_von\\_CFK-Bauteilen\\_schneller\\_und\\_besser\\_als\\_spanende\\_Verfahren\\_n102495](http://www.kunststoffweb.de/neueprodukte/Laserschneiden_von_CFK-Bauteilen_schneller_und_besser_als_spanende_Verfahren_n102495)

- Lagüela, S., González-Jorge, H., Armesto, J., & Arias, P. (2011). Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements. *Infrared Physics & Technology*, 54 (2), S. 92-99.
- Lagüela, S., González-Jorge, H., Armesto, J., & Herráez, J. (2012). High performance grid for the metric calibration of thermographic cameras. *Measurement Science and Technology*, 23 (1), S. 015402.
- Laserzentrum Hannover. (2012). Abgerufen am 13. 7 2012 von Projektübersicht: <http://www.lzh.de/de/projects>
- Li, M., Holland, S. D., & Meeker, W. Q. (2010). Statistical methods for automatic crack detection based on vibrothermography sequence-of-images data. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 26 (5), S. 481-495.
- Lucieer, A. (2004). *Uncertainties in Segmentation and their Visualisation*. Utrecht University: Dissertation.
- Luhmann, T. (2010). Geometric Calibration of Thermographic Cameras.
- Luhmann, T. (2010). Geometric Calibration of Thermographic Cameras.
- Marinetti, S., Grinzato, E., Bison, P. G., Bozzi, E., Chimenti, M., Pieri, G., et al. (2004). Statistical analysis of IR thermographic sequences by PCA. *Infrared Physics & Technology*, 46 (1-2), S. 85-91.
- Nau, M. (2004). *Elektrische Temperaturmessung*. Fulda: JUMO.
- Niemeyer, W.-H., & Splithöfer, S. (2005). Perfekter Schnitt. *HOLZtechnologie* (2), S. 35-43.
- Profos, P., & Pfeifer, T. (1994). *Handbuch der industriellen Meßtechnik*. München: Oldenbourg.
- Rajic, N. (2002). Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. *Composite Structures*, 58 (4), S. 521-528.
- Rajic, N. (2002). Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures. *Composite Structures*, 58 (4), S. 521-528.
- REFA. (1998). *Ausgewählte Methoden zur Prozessorganisation; Arbeitssysteme- und Prozessmanagement*. Darmstadt.
- Roelfs, T. (02.11.2011). (Jade Hochschule, Herausgeber) Abgerufen am 17. 7 2013 von Geometrische Kalibrierung von Thermographiekameras: [http://iapg.jade-hs.de/projekte/sensortechnik/downloads/111102\\_ws/03\\_Geometrische%20Kalibrierung%20Thermographiekameras\\_Roelfs.pdf](http://iapg.jade-hs.de/projekte/sensortechnik/downloads/111102_ws/03_Geometrische%20Kalibrierung%20Thermographiekameras_Roelfs.pdf)
- Schedler, W. (1988). *Hartmetall für den Praktiker: Aufbau, Herstellung, Eigenschaften und industrielle Anwendung einer modernen Werkstoffgruppe*. VDI-Verlag.



- Schmutzler, H., Liebig, W., Garcia, A., Knoll, J. B., & Schulte, H. W. (kein Datum). Potential and challenges of active thermography for composite parts and structures.
- Siemer, U. (2010). *Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Automobilindustrie*. Universität des Saarlandes: Dissertation.
- Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser material processing* (4. Ausg.). London: Springer.
- Stoessel, R., Krohn, N., Pfeiderer, K., & Busse, G. (2002). Air-coupled ultrasound inspection of various materials. *Ultrasonics*, 40 (1-8), S. 159-163.
- Tsai, R. Y., & Lenz, R. K. (1989). A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 5 (3), S. 345-358.
- Wöhe, G., & Döring, U. (2005). *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre* (22., neubearb. Aufl. Ausg.). München: Vahlen.
- Wollnack, J. (2011). Von Implizite und explizite parametrische Modelle und Parameteridentifikation:  
<http://www.tuhh.de/ft2/wo/Scripts/Systemtheorie/SystemAnalyse.pdf> abgerufen
- Wollnack, J. (kein Datum). Dreidimensional messende videometrische Messsysteme. TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG - HARBURG.
- Wollnack, J. (2001). *Videometrische Verfahren zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern*. Aachen: Shaker.
- Zäh, M. F., Schlickerieder, K., & Mosandl, T. (2003). Zerstörungsfreie Prüfverfahren und ihre Eignung für die Klebtechnik. In *Adhäsion* (Bd. 47, S. 26ff). Wiesbaden: Vieweg + Teubner GWV Fachverl.;Hadert-Lexikon-Verl.;Ullstein;Berliner Fachverl.;Bertelsmann.
- Zöcke, C. M. (2009). Von Quantitative analysis of defects in composite material by means of optical lockin thermography: <http://d-nb.info/1004169965/34> abgerufen