

Fertigungszelle und Prozesskette zur flexiblen Herstellung von Oberflächendesignstrukturen auf Werkzeugoberflächen »FlexOStruk«

Abschlussbericht

In Kooperation mit

VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH
BMW Group
Delcam GmbH
Edgewave GmbH
ProLas Produktionslaser GmbH
SIEMENS A&D
SIEMENS SCH
Steinbichler Optotechnik GmbH

FKZ: 16IN0191

Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnologie IPT

Steinbachstraße 17
52074 Aachen
Tel.: +49 (0) 241 / 8904 - 100
Fax: +49 (0) 241 / 8904 - 198

Erstellt von

Dipl.-Ing. Mario Kordt
Dipl.-Ing. Stephan Bichmann
Dipl.-Ing. Holger Mescheder
Dipl.-Ing. Dipl. Inform.
Lothar Glasmacher

Aachen, August 2007

Werkzeugmaschinenlabor - WZL
der Rheinisch-Westfälischen
Technischen Hochschule Aachen

Steinbachstraße 53 B
52074 Aachen
Tel: +49 (0) 241 / 80 - 27407
Fax: +49 (0) 241 / 80 - 22293

Erstellt von

Dipl.-Ing. Torsten Gerrath

Aachen, August 2007

Institut für Ergonomie und
Designforschung IED,
Universität Duisburg-Essen

Universitätsstraße 12
45117 Essen
Tel.: +49 (0) 201 / 183 - 4482
Fax: +49 (0) 201 / 183 - 4328

Erstellt von

Dipl. Des. Axel Heppener
Nadine Seumenicht BA (Hons)

Essen, August 2007

Inhalt

1	Vorwort	5
2	Danksagung	6
3	Wissenschaftlicher und technischer Stand der Oberflächenstrukturierung	7
4	Motivation und Zielsetzung	9
5	Planung und Ablauf des Vorhabens	11
5.1	Vorgehensweise	11
5.2	Partnerstruktur und deren Aufgaben	12
5.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	16
6	Prozesskette »FlexOStruk«	17
7	Projektergebnisse in den Arbeitspaketen	21
7.1	Messtechnik	21
	7.1.1 Aufnahme von Referenzstrukturen	21
	7.1.2 In-Prozess Messtechnik: Makro	23
7.2	Design der Strukturen im CAD	27
	7.2.1 Entwicklungstrends in der Oberflächengestaltung	27
	7.2.2 Benutzte Informations- und Dokumentationsdienste	28
	7.2.3 Oberflächendesignstrukturen: Überblick	29
	7.2.4 Aufbau von Oberflächendesignstrukturen	30
	7.2.5 Einteilung der unterschiedlichen Oberflächen- designstrukturen	31
	7.2.6 Einsatzgebiete von Oberflächendesignstrukturen	31
	7.2.7 Anforderungen an Oberflächendesignstrukturen und Funktionen von Oberflächendesignstrukturen	32
	7.2.8 Optische Anmutung	32
	7.2.9 Haptische Anmutung	33
	7.2.10 Gebrauchseigenschaften	34
	7.2.11 Technische Funktionen	34
	7.2.12 Vorteile von Oberflächendesignstrukturen	34
	7.2.13 Gestaltung von Oberflächendesignstrukturen	35
	7.2.14 Umfrage zum Thema Oberflächendesignstrukturen in produzierenden Unternehmen	38
	7.2.15 Aufbau des Fragebogens und Durchführung der Befragung	39
	7.2.16 Ergebnisse des Fragebogens	40



7.3	Anlagenentwicklung	42
7.3.1	<i>Auswahl und konstruktive Bearbeitung eines Achssystems / Konstruktive Laserintegration / Aufbau einer Demonstratoranlage</i>	42
7.3.2	<i>Steuerungsimplementierung / Betrachtung der Mensch-Maschine-Schnittstelle</i>	50
7.3.3	<i>Messtechnische Untersuchungen / Optimierung des Gesamtsystems / Maschinenseitige Anpassung an optische und messtechnische Komponenten</i>	51
7.4	CAD/CAM-Technik	55
7.4.1	<i>Strukturabbildung mittels Displacement-Mapping</i>	56
7.4.2	<i>Dreidimensionale Strukturentwicklung im CAD</i>	58
7.4.3	<i>Strukturentwicklung durch grafische Bearbeitung der Höhenkarte</i>	59
7.4.4	<i>Größe der Vorlagenstruktur</i>	60
7.4.5	<i>Digitale Strukturübertragung</i>	60
7.4.6	<i>Textur und Texturkoordinaten</i>	61
7.4.7	<i>Zuweisung der Struktur und Berechnung der strukturierten Oberfläche</i>	63
7.4.8	<i>3D-Segment-Prozess</i>	65
7.4.9	<i>Lasermodulesteuerung durch »NCProfiler - FlexOStruk«</i>	68
7.5	Untersuchungen zum 3D-Laserstrahlstrukturieren	69
7.5.1	<i>Justage und Kalibrierung des Lasermoduls</i>	69
7.5.2	<i>Bestimmung der Betriebsparameter des Lasermoduls</i>	70
7.5.3	<i>Theoretische Betrachtung des Abtragprozesses</i>	74
7.5.4	<i>Grundlegende Abtragversuche</i>	75
7.5.5	<i>Metallurgische Betrachtung der abgetragenen Oberflächenrandzone</i>	83
7.5.6	<i>Definierte Laser-Tools in Prozess- und Technologiedatenbank</i>	85
7.5.7	<i>Komplexe 3D-Strukturen aus Einzelschichten</i>	86
7.5.8	<i>Strukturkachelung auf ebenen und gewölbten Oberflächen</i>	88
7.5.9	<i>Entfernung von Abtragrückständen</i>	93
7.6	Pilotanwendungen und Wirtschaftlichkeit	94
7.6.1	<i>Pilotbauteil 1: Musterplatte mit Lederstruktur</i>	94
7.6.2	<i>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</i>	97
7.6.3	<i>Pilotbauteil 2: Musterplatte mit synthetischer Struktur</i>	99
7.6.4	<i>Abmusterung von Teststrukturen</i>	101



8	Öffentlichkeitsarbeit	104
9	Zusammenfassung	105
10	Literatur	108



1 Vorwort

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse zusammen, die im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens »Fertigungszelle und Prozesskette zur flexiblen Herstellung von Oberflächendesignstrukturen auf Werkzeugoberflächen – FlexOStruk« durch die Industrieunternehmen BMW Group, Delcam GmbH, Edgewave GmbH, ProLas Produktionslaser GmbH, SIEMENS A&D, SIEMENS SCH Steinbichler Optotechnik GmbH sowie den Forschungseinrichtungen Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Werkzeugmaschinenlabor – WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und Institut für Ergonomie und Designforschung IED der Universität Essen-Duisburg erarbeitet worden. Es handelt sich somit um einen gemeinsamen Abschlussbericht.

Viele Daten, vornehmlich aus den Arbeitsbereichen Design der Strukturen und Pilotanwendungen enthalten unternehmensinterne Informationen der beteiligten industriellen Projektpartner und durften nur im Rahmen des Projekts verwendet werden. Aus diesem Grund ist dieser Abschlussbericht vertraulich zu behandeln und darf nicht der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

2 Danksagung

An dieser Stelle bedanken wir uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung des Verbundforschungsvorhabens » Fertigungszelle und Prozesskette zur flexiblen Herstellung von Oberflächendesignstrukturen auf Werkzeugoberflächen – FlexOStruk«. Das Projekt wurde im Rahmen des Kooperationsförderungsprogramms »INNONET – Förderung von innovativen Netzwerken« unterstützt, dass durch die VDI/VDE Innovation + Technik GmbH betreut wurde.

Weiterhin bedanken wir uns bei der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH für die sehr gute Beteiligung und Betreuung während der Antragsphase und der Projektbearbeitung.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Oberflächenstrukturierung

Im Folgenden werden die bekannten Verfahren zur Herstellung von Oberflächenstrukturen kurz skizziert.

Mit dem Spritzgussverfahren lassen sich Spritzgussteile herstellen, deren Oberflächenform weitgehend frei gewählt werden kann. Glatte Oberflächen werden beispielsweise für optische Anwendungen und Narbungen für berührungsfreundliche Bereiche hergestellt. In der Automobilindustrie liegt der Anteil an Spritzgussteilen bei Instrumententafeln bei etwa 30 Prozent [OHLI01, S. 1]. Spritzgussteile kommen auch in kombinierten Materiallösungen mit Folie sowohl im Instrumententafel- als auch im Türseitenbereich zur Anwendung [OHLI01, S. 1]. Folienbahnen zur Oberflächengestaltung werden mit Hilfe der Prägetechnik hergestellt [OHLI01, S. 2]. Ein weiteres Verfahren zur Oberflächenstrukturierung bildet der Slush- bzw. Sinterprozess. Im Instrumententafelbereich werden Slush- oder Sprühhäute aufgrund der Herstellung bauteilspezifischer Häute bei gleichzeitiger Generierung eines homogenen Narbbildes bevorzugt eingesetzt. Ein Verzug einer im Sinterprozess hergestellten Haut im Zuge der weiteren Bauteilherstellung findet nicht statt [OHLI01, S. 3]. Oberflächen können mittels Prägeprozess strukturiert werden. Dabei werden Prägezylinder eingesetzt. Diese sind entweder Stahlzylinder, bei denen die Narbung mit Hilfe von gehärteten Stahlmouletten segmentweise eingedrückt wird – Moulettenübergangsbereiche werden manuell nachgearbeitet, oder Stahlzylinder, die mit einer genarbten Polymerschicht (Silikon) beschichtet sind [OHLI01, S. 3]. Stahlzylinder sind Prägwerkzeuge, die aus unterschiedlichen Gründen wie z. B. einer geringen Abbildungstreue, einem hohen Informationsverlust, langen Entwicklungszeiten und einer mangelnden Kontrolle bei der Entstehung deutlich an Bedeutung verloren haben. Sie werden nur noch für einfache, meist technische Narben eingesetzt [OHLI01, S.31]. Lederechwalzen haben eine hohe Abbildungs- und Detailtreue und einen geringen Informationsverlust (10-20%) und sind daher prädestiniert für das Kopieren von natürlichem Leder [OHLI01, S. 3]. Bei der Laserstrukturierung von polymerbeschichteten, stoßkantenfreien Stahlwalzen sind aufgrund des feinen Laserstrahls hoch aufgelöste Narbstrukturen darzustellen. Es besteht eine völlige Designfreiheit für Narbstrukturen, die virtuell am Rechner visualisiert werden können und somit Änderungen ohne großen Aufwand möglich machen. Mit der Laserbearbeitung in Silikonmaterial ist es möglich, Oberflächen mit einer Mikrorauhigkeit zu erzeugen, die dazu beiträgt, den Glanz von damit geprägten Folien deutlich zu reduzieren und das Reflexionsverhalten der Folien positiv zu beeinflussen. Ohlinger [OHLI01, S. 4] beschreibt dieses Verfahren mit dem höchsten Potential für zukünftige Entwicklungen. Der Kunde wird in die Entwicklung mit einbezogen und neue nicht an Naturvorlagen gebundene Dekorstrukturen können generiert werden. Mit der Ätztechnik bzw. Ätznarbung wird eine Struktur in ein Werkzeug aus Aluminium oder Stahl geätzt. „Während es sich bei den Strukturen aus der Anfangszeit um einfache Ätzungen handelte, sind heute häufig mehrstufige Ätzverfahren – kombiniert mit einem definierten Oberflächenglanz – im Einsatz. Hierbei



dient das Ätzen dazu, Oberflächen von Materialien wie Leder, Leinen, Textil oder geschliffenes Metall zu imitieren“ [KRÜE05]. Darüber hinaus können auch Ero-dierstrukturen nachgebildet und Oberflächen mit phantasievollen oder geometri-schen Strukturbildern versehen werden [KRÜE05].

Echtleder ist im Fahrzeuginnenraum schon lange in Gebrauch. So werden Fahr-zeuge der Luxusklasse zunehmend mit Leder kaschierten Innenverkleidungsteilen wie Instrumententafel, Mittelkonsole und Türverkleidung ausgestattet. Das direk-te Hinterschäumen ist seit einigen Jahren sehr bedeutend, denn dieses Verfahren überzeugt durch Vorteile wie genauer Nahtverlauf, kürzere Zykluszeit und ein-stellbare Haptik [NOIS02].



4 Motivation und Zielsetzung

Die Aufgabe des Werkzeug- und Formenbaus besteht in der Bereitstellung von Betriebsmitteln für produzierende Unternehmen. Einerseits gibt es eigenständige, auf den Werkzeugbau spezialisierte Unternehmen, die als Zulieferer tätig sind oder andererseits existieren innerhalb von Großunternehmen eigene Werkzeugbausparten, die als Dienstleister für das Unternehmen tätig sind. Die Branche nimmt eine Schlüsselstellung in der industriellen Wertschöpfungskette ein. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass der Werkzeug- und Formenbau einen großen Einfluss auf die Termintreue der Produktion hat, da er nicht nur den Startzeitpunkt der Produktion sondern auch die Rüst- und Zykluszeiten beeinflusst. Zum anderen bestimmt er maßgeblich die Kosten des Produkts. Die Zeit bis zur Markteinführung eines Produkts wird dabei bis zu 25 % von der Konstruktion und Fertigung der Werkzeuge bestimmt. Die Kosten für Betriebsmittel, in denen auch die Herstellungskosten der Werkzeuge beinhaltet sind, können bis zu 30 % der gesamten Produktionskosten ausmachen [EVER98, S. 2], [GROS04].

Aufgrund stetig steigender und wechselnder Kundenanforderungen hinsichtlich Haptik und Optik von Bauteiloberflächen, seien es dekorative oder technische Oberflächen, bestehen für die Anbieter erhöhte und zum Teil veränderte Produktionsanforderungen. Auf den Bauteiloberflächen müssen definierte Strukturen eingebracht werden, so dass diese neuen Aufgabenstellungen verstärkt dem Werkzeug- und Formenbau begegnen. Dazu kommen die kürzeren Produktlebenszyklen, die eine erhöhte Flexibilität und eine Ausnutzung aller Zeit- und Kostenzentrale bei der Herstellung von strukturierten Oberflächen erfordern.

Die Entwicklung bisheriger Narbstrukturen ist geprägt von diffusen und morphen Oberflächen. Geometrische Muster und Strukturen sind aufgrund der Strukturierung nur mit erheblichen Zeit- und Kostenaufwand möglich. Es sind demnach neue Prozessketten zu entwickeln, welche flexible, schnell und wirtschaftlich die neuen Anforderungen der Designer und des Werkzeugbaus umsetzen. Weiterhin sind neue, angepasste Schritte in der Form- bzw. Designgestaltung gefordert. Die Gestaltung von Oberflächen darf nicht mehr durch die konventionellen Methoden eingeschränkt werden – völlig neuartige Designs müssen möglich sein.

In der Automobilindustrie werden z. B. im Interieurbereich (vgl. Abb. 1) Oberflächen eingesetzt, die mit einer speziellen Narbung (meist lederähnlich) versehen sind, um die Optik bzw. Haptik und somit den Qualitätseindruck des Produkts erheblich zu verbessern. Die Flexibilität, Schnelligkeit und Reproduzierbarkeit des Herstellungsverfahrens für die gewünschte Oberflächenstruktur ist dabei entscheidend. Konventionelle Verfahren, wie Ätztechnik oder die Herstellung mittels Belederungsmodell und galvanischem Abformen, weisen eine geringe Flexibilität sowie einen hohen Zeit- und Kostenaufwand auf. So beläuft sich der derzeitige Zeitaufwand im Bereich Cockpit/Automobil für die Herstellung eines Werkzeugs mittels Belederungsmodell auf mehrere Monate. Die Herstellung mit Hilfe ätz-

technischem Abtragen liefert zudem eine Oberflächenstruktur, welche stochastischer Natur ist und somit nicht definiert oder reproduzierbar ist.



Abb. 1: Narbstrukturen auf Oberflächen im Automobilinnenraum [BMW AG]

Es soll daher eine neue, gesamtheitliche und durchgängige Prozesskette entwickelt werden, die gegenüber den konventionellen Verfahren eine deutlich flexiblere und schnellere Herstellung von Narbstrukturen in Werkzeugoberflächen ermöglicht. Dabei soll die Prozesskette alle nötigen Arbeitsschritte, beginnend bei der digitalen Strukturerstellung bis hin zu Fertigung, beinhalten.

Nachfolgende Arbeitsschritte ermöglicht die Prozesskette »FlexOStruk«:

Dreidimensional entworfene oder mit optischer Messtechnik eingelesene Designstrukturen können mit einer speziellen CAD-Software definiert und verzerrungsfrei auf das Bauteil aufgebracht werden. So kann der Designer auf besondere Bauteilanforderungen reagieren und die Oberflächengestaltung stärker als bisher beeinflussen. Für die anschließende Bearbeitung der Freiformoberfläche wurde eine eigene, spezialisierte Anlage zum Laserstrahlstrukturieren aufgebaut, die auf einer hochpräzisen 5-Achs-HSC-Anlage basiert und mit einer speziellen Steuerungserweiterung ausgestattet ist. Die Wege für die Bewegungsführung des Laserstrahls generiert dabei ein konventionelles CAM-System im ISO-NC-Code. Die Software »NCProfiler-FlexoStruk«, die das Fraunhofer IPT zu diesem Zweck entwickelt hat, steuert die Anlage und den Laserprozess automatisiert. Eine Technologie- und Prozessdatenbank umfasst alle erforderlichen Prozessdaten und erlaubt so eine werkstattorientierte Bearbeitung anhand greifbarer Kenngrößen. Der Laserstrahl bringt die Struktur direkt durch Sublimation in das Werkzeug ein, so dass auch schwer zerspanbare Werkstoff in einer hohen Qualität bearbeitet werden können. Mit diesem Verfahren liegt eine hohe Reproduzierbarkeit und Strukturflexibilität in der Herstellung von strukturierten Werkzeugoberflächen vor.



5 Planung und Ablauf des Vorhabens

5.1 Vorgehensweise

Im Rahmen der zweistufigen Antragsstellung wurde mit allen Projektpartnern ein detaillierter Arbeitsplan ausgearbeitet, der die zeitliche Abfolge und den personellen Aufwand der einzelnen Arbeitspakete vorgab. Der Arbeitsplan diente allen Projektpartnern als grundsätzliche Arbeitsgrundlage. Im Laufe des Projekts mussten, in Absprache mit allen Projektpartnern, jedoch Kapazitätsumverteilungen im Arbeitsplan vorgenommen werden. Durch unvorhersehbare Problemfelder und zusätzliche auftretende Arbeitsschwerpunkte, die während der Antragstellung nicht berücksichtigt werden konnten, waren die Anpassungen im Arbeitsplan zur Erreichung der Zielstellung zwingend notwendig. Zum einen wurden nicht zur direkten Zielerreichung notwendige Arbeitspakete gekürzt und zum anderen wurden zusätzliche personelle Kapazitäten der Forschungseinrichtung zur Verfügung gestellt.

In der anfänglichen Definitionsphase des Projekts wurden die wichtigen Anforderungen der Anwender an eine neue Prozesskette zur Herstellung von strukturierten Werkzeugoberflächen aufgenommen und in Form eines Lasten- und Pflichtenhefts zusammengefasst. Das Lasten- und Pflichtenheft diente den Forschungseinrichtungen und den Systementwicklern als Zielgröße und unterlag während des Projekts ständigen Anpassungen und Konkretisierungen. Anhand des Lasten- und Pflichtenhefts wurden in der Konzeptphase ein Maschinendemonstrator und eine Kernbearbeitungsstrategie für die konturnahe und großflächige Oberflächenstrukturierung erarbeitet, so dass daraufhin konkrete Arbeitspakete für die einzelnen Projektpartner vorlagen. In der darauf folgenden Ausarbeitungsphase wurden die Arbeitspakete von den entsprechenden Projektpartnern selbstständig bearbeitet, wobei aufgrund des Prozesskettengedankens eine enge Zusammenarbeit in Form von zahlreichen Arbeitstreffen vorlag. Dabei wurden insbesondere die Schnittstellen der einzelnen Prozesskettenschritte definiert und abgeglichen. In der Zusammenführungsphase wurden alle Teilergebnisse bzw. Einzel-Systemlösungen zu einem Gesamtsystem vereint. Danach erfolgte die Test- und Optimierungsphase, in der nach den Vorgaben der Anwender das Gesamtsystem untersucht und in Teilbereichen optimiert wurde. In der abschließenden Pilotanwendungsphase wurden verschiedene industriennahe Testbearbeitungen und eine dazugehörige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Die zuvor beschriebene Vorgehensweise (Abb. 2) setzt eine enge Zusammenarbeit der einzelnen Projektpartner untereinander, eine hohe Interdisziplinarität und ein entsprechendes Projektmanagement voraus.

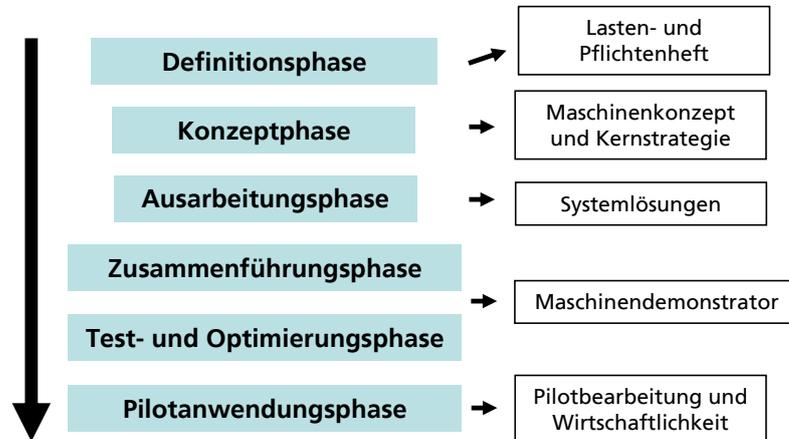


Abb. 2: Vorgehensweise im Projekt »FlexOStruk«

5.2 Partnerstruktur und deren Aufgaben

Das Konsortium deckt forschungsseitig alle Kompetenzen ab, die für die Entwicklung einer produktfähigen Prozesskette notwendig sind (Abb. 3). Ebenso ist das gesamte fertigungs- und anlagentechnische Know-how vertreten, das für die Entwicklung und Aufbau eines seriennahen Prototyps erforderlich ist. In das Industriekonsortium ist ein Hersteller für das mögliche Gesamtsystem eingebunden. Außerdem ist die Herstellung von wichtigen Systemkomponenten wie CAD/CAM-System, Laserstrahlquelle, Messsensortechnik und Sondermaschinenbau durch die Beteiligung von Unternehmen sichergestellt. Die Marktnähe wird durch die Integration von Anwendern realisiert.

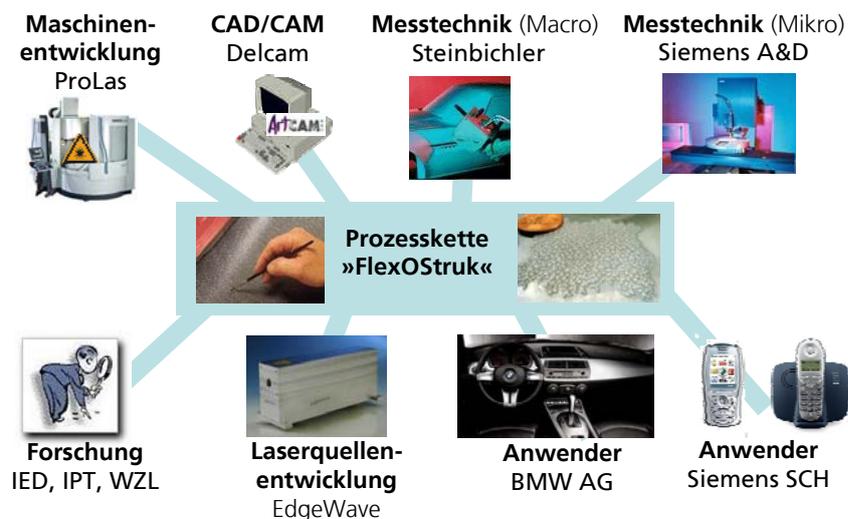


Abb. 3: Partnerstruktur im Projekt »FlexOStruk« und deren Aufgaben

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT:

Das Fraunhofer IPT erarbeitet produktionstechnische Systemlösungen für KMUs. Schwerpunkte sind dabei die Neu- und Weiterentwicklung von Fertigungsverfahren, der Mess- und Qualitätstechnik sowie der entsprechenden Anlagen- und Maschinenkonzepte. Innovations- und Technologiemanagement ergänzen das Leistungsangebot, um neue Technologien in gewachsene Unternehmensstrukturen einfügen zu können. Die Erreichung von Prozessstabilität und Sicherheit steht dabei immer an erster Stelle. Das Fraunhofer IPT verfügt über langjährige Erfahrung im Bereich der Lasermaterialbearbeitung – Laserstrahlmikrobearbeitung. Das Laserstrahlstrukturieren wird bereits am Fraunhofer IPT im Bereich der tribologischen Anwendung (Verschleißminimierung von Tribokontakten) erfolgreich eingesetzt. Weiterhin werden am Fraunhofer IPT ebenfalls die klassischen Technologien des Werkzeug- und Formenbaus verfolgt, wie z. B. 5-Achs-Bearbeitung, HSC-Fräsen, Erodieren und CAM-Technologien. Im Fraunhofer IPT sind drei Abteilungen im Projekt »FlexOStruk« involviert: Messtechnik, CAD/CAM-Technologie und Lasertechnologie, die im ständigen Kontakt miteinander und im Austausch untereinander stehen. Dadurch ist eine gesamtheitliche Bearbeitung gesichert.

Arbeitsschwerpunkte:

- Projektleitung und -koordination (Projektmanagement)
- Messtechnische Erfassung von Referenzstrukturen und Datenaufbereitung
- Messtechnische In-Prozess Endkontrolle
- Entwicklung der software- und steuerungstechnischen Schnittstelle zwischen Werkzeugmaschine und Lasermodul
- Entwicklung einer CAD/CAM-Kopplung sowie einer Prozess- und Technologie-datenbank
- Technologieuntersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren
- Durchführung der Pilotanwendungen (Anwendungserprobung)
- Technologietransfer

Werkzeugmaschinenlabor – WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen:

Das WZL besteht seit 1906 und steht für Innovation in der Produktionstechnik. Das WZL führt sowohl grundlagenbezogene als auch an den Erfordernissen der Industrie ausgerichtete Forschungsvorhaben durch und erarbeitet praxisgerechte Lösungen zur Rationalisierung der Produktion. Aus der Zielsetzung, den Gesamtbereich der Produktionstechnik in einem Hause zu behandeln, resultiert ein breites Arbeitsgebiet, das sich auf die Unternehmensbereiche Entwicklung und Konstruktion, Qualitätsmanagement, Organisation, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Montage sowie Steuerung und Automatisierung ausrichtet. Sowohl die Entwicklung einzelner Maschinenelemente und -teilsysteme wie Lagerungen oder Achsen als auch die Konzipierung und Realisierung von neuartigen Maschinensystemen (z.B. auf Grundlage von Stabkinematiken) sind Gegenstand der umfassenden Tätigkeiten. Die am WZL durchgeführte Forschung zeichnet sich durch die enge Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen sowie eine ausgewogene Mischung von Grundlagenforschung und anwendungsbezogener Entwicklung aus. In

diesem Vorhaben ist die Abteilung Werkzeugmaschinen involviert, die sich u. a. mit der Entwicklung von Sondermaschinen befasst.

Arbeitsschwerpunkt:

- Entwicklung und Aufbau der Laserstrahlstrukturieranlage

Institut für Ergonomie und Designforschung IED, Universität Duisburg-Essen:

Das IED ist als Organisation am Fachbereich 4 / Design und Kunsterziehung zum einen für die Lehre der Arbeitswissenschaften und Ergonomie, speziell in design-relevanten Themengebieten zuständig. Zum anderen werden vom Institut zahlreiche Forschungsprojekte und kommerzielle Kooperationen bearbeitet. Das internationale Mitarbeiterteam setzt sich dabei aus unterschiedlichen Bereichen zusammen: Psychologie, Maschinenbau und vor allem Design. Das Institut sieht seinen Schwerpunkt in Entwicklung menschengerechter Konzepte und Produkte. Dabei steht das Interface zwischen Mensch und Maschine im Mittelpunkt der Entwicklung, an dieser Stelle entscheidet sich, ob ein Produkt gut gestaltet ist oder nicht. Nur wenn eine perfekte Kommunikation zwischen beiden Polen der Situation herrscht, hat ein Produkt seine Aufgabe erfüllt, dies zu gewährleisten ist für das IED der Fokus im Industrial Design. Darüber hinaus ist das IED Partner bei der Entwicklung neuer Produktkonzepte, die über den Bereich des klassischen Industrial Designs hinausgehen und konzeptionellere/grundsätzliche Ansätze erfordern.

Arbeitsschwerpunkte:

- Entwicklung neuer Oberflächentexturen (Methodiken)
- Entwicklung von Algorithmen zur Strukturübertragung und Kachelung

BMW Group:

BMW ist einer der größten und innovativsten Automobilhersteller der Welt und muss sich hinsichtlich der starken Konkurrenz ständig nach neuen und innovativen Fertigungsmöglichkeiten für ihr breites Produktspektrum umsuchen. Insbesondere die Strukturierung von Kunststoffoberflächen steht dabei im Vordergrund, da diese immer mehr das Kaufverhalten der Kunden beeinflussen.

Arbeitsschwerpunkte:

- Definition der Anforderungen
- Qualifizierung der Prozesskette (Anwendungserprobung)
- Technologietransfer

Siemens SCH:

Siemens SCH ist eine Konzernsparte der Siemens AG und ist der zentrale Betrieb für die Telefonfertigung und Übertragungstechnik. Zu Ihrem Produktspektrum zählen die Entwicklung und Fertigung von analogen und digitalen Schnurlostelefonen. In diesem Bereich liegen äußerst kurze Produktlebenszyklen vor und die Kunden fordern innovative Produktideen in Form und Funktion.

Arbeitsschwerpunkte:

- Definition der Anforderungen



- Qualifizierung der Prozesskette (Anwendungserprobung)
- Technologietransfer

Steinbichler Optotechnik GmbH:

Das Unternehmen Steinbichler Optotechnik GmbH steht für innovative optische Mess- und Sensortechnik. Abgerundet wird das Angebot durch Service- und Beratungsleistungen aus den Bereichen Digitalisierung, Verformungs- und Schwingungsanalyse sowie aus dem Bereich Holografie. Zahlreiche Patente belegen die Kompetenz und Innovationskraft des Unternehmens. Zur Bestimmung von 3D-Koordinaten entwickelt die Steinbichler Optotechnik intelligente optische Messsysteme. Dynamische Messtechnologien auf der Basis von Triangulationsscannern und Verfahren der Weißlichtprojektion sind die physikalische Grundlage der unterschiedlichen Systeme. Koordinaten von Freiformflächen werden mit sehr hoher Punktdichte präzise und schnell bestimmt. Das Anwendungsspektrum reicht von der Produktentwicklung über die Qualitätskontrolle bis zum Reverse Engineering.

Arbeitsschwerpunkte:

- Charakterisierung von Designstrukturen und Werkzeugformen
- In-Prozess Messtechnik zur Qualitätskontrolle

ProLas Produktionslaser GmbH:

Die PROLAS Produktionslaser GmbH ist ein expandierendes mittelständiges Unternehmen im Bereich Sonderanlagenbau und Systemintegration mit dem Schwerpunkt Schweißen, Schneiden und Markieren mittels Laserstrahlung. Ziel des Aachener Unternehmens sind kundenspezifische Problemlösungen in der industriellen Fertigung durch den Einsatz von Lasern.

Arbeitsschwerpunkt:

- Entwicklung und Aufbau der Laserstrahlstrukturieranlage

EdgeWave GmbH:

Die Firma EdgeWave ist ein Spin-Off aus dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen und befasst sich mit der Entwicklung, Fertigung und Vertrieb von Laserstrahlquellen sowie peripherer Komponenten und die Beratung im Umfeld des Einsatzes derartiger Quellen. Schwerpunktmäßig betreibt die Firma EdgeWave die Überführung der technologisch innovativen Konzepte aus der Forschung und Entwicklung in Produkte auf dem Gebiet der Laserstrahlquellen zur Mikrobearbeitung. Sie erarbeitet in Zusammenarbeit mit den Kunden und Partnern effektiv und zielstrebig lasertechnische Lösungen, welche sie dann qualifiziert bereitstellt. Ziel ist die Steigerung der Produktivität, der Flexibilität und der Wirtschaftlichkeit bei den Kunden.

Arbeitsschwerpunkte:

- Entwicklung und Aufbau einer Laserstrahlquelle
- Integration der Laserstrahlquelle ins Lasermodul



Delcam GmbH:

Das Unternehmen Delcam GmbH aus Langen ist einer der führenden Entwickler und Anbieter für CAD/ CAM-Software für die dreidimensionale Konstruktion, Herstellung und Prüfung komplexer Formen. Delcam hat eine 3D-CAD/CAM-Komplettlösung, die so genannte Power Solution-Familie entwickelt, die den gesamten Herstellungszyklus abdeckt.

Arbeitsschwerpunkt:

- Entwicklung einer durchgängigen CAD/CAM-Kopplung

Siemens A&D:

Der Siemens A&D Geschäftszweig Mechatronics entwickelt und produziert innovative Produkte für die Bereiche Halbleiterindustrie, Telekommunikation und Biotechnologie. Das Zusammenwirken von feinsten Mechanik, komplexer Optik, hochwertiger Elektronik mit intelligenter Software bilden hierbei die Grundlage für die einzigartigen Produkte des Bereichs Mechatronics. Die Sparte »Siscan« der Siemens A&D ist einer der weltweit führenden Hersteller für schnelle 3D Messtechnik. Extreme Anforderungen an die Produktqualität erfordern eine ständige Kontrolle aller Parameter. Hierbei spielt die optimale Verbindung zwischen Messgeschwindigkeit und Messgenauigkeit eine besondere Rolle. Die Messsysteme werden nicht nur in der Halbleiterindustrie, sondern auch in der Automobilindustrie und anderen sicherheitsintensiven Bereichen eingesetzt.

Arbeitsschwerpunkt:

- Aufbau und Maschinenintegration eines hybriden Messsystems zur Strukturcharakterisierung

5.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Erreichung des Projektziels wurden zwei zusätzliche Unternehmen in die Projektarbeit miteingebunden, weil spezielle Arbeiten und Entwicklungen, welche erst während der Projektlaufzeit auftraten, nicht vom Projektkonsortium geleistet werden konnte.

Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH – KIMW
Forschungsdienstleister aus dem Bereich Oberflächentechnik und Spritzgießen

Arbeitsschwerpunkt:

- Abmusterung der Pilotanwendungen

Maschinen - Revisions AG Kurt Müller

Maschinenüberholung, Elektrokonstruktion, PLC / CNC Programmierung und Softwareentwicklung

Arbeitsschwerpunkt:

- PLC-Anpassung des Maschinengrundträgers (Steuerungssynchronisation)

6 Prozesskette »FlexOStruk« und Kernstrategie »3D-Segment-Prozess«

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte in der Prozesskette »FlexOStruk« und die entwickelte Kernstrategie »3D-Segment-Prozess« näher vorgestellt, damit ein Gesamtverständnis über die hier erzielten Projektergebnisse vorliegt.

Prozesskette »FlexOStruk«

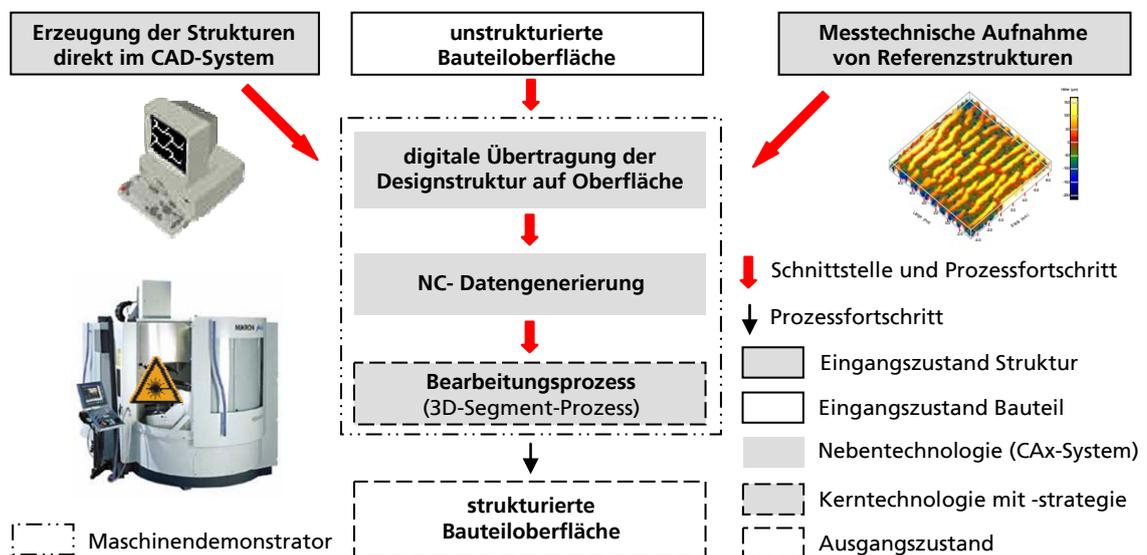


Abb. 4: Entwickelte und umgesetzte Prozesskette »FlexOStruk«

Eingangszustand

Eine Aufteilung des Eingangszustands in die unstrukturierte Oberfläche und in die Designstruktur ist sinnvoll. Die Makrogeometrie der unstrukturierten Oberfläche ist durch vorgelagerte Verfahren bereits vollständig hergestellt. Die Geometrieform, der Werkstoff und der Oberflächenzustand haben erhebliche Einflüsse auf die nachfolgenden Prozessschritte. Die Gestalt der Designstruktur muss aufgrund der geforderten Datendurchgängigkeit der Prozesskette stets vollständig mathematisch beschrieben sein, so dass die Strukturerzeugung von großer Bedeutung ist. Um eine hohe Strukturflexibilität und somit eine breite Anwendung der Prozesskette zu gewährleisten, können sowohl direkt im CAD entwickelte Strukturen als auch digitale Abbilder bereits bestehender Referenzstrukturen bearbeitet werden. Im CAD entwickelte Strukturen liegen zwar bereits in einem digitalen Datenformat vor, müssen jedoch durch geeignete Austauschformate für die Weiterverarbeitung im CAx-System angepasst werden. Außerdem sind das Datenformat und die Datenmenge zu berücksichtigen, so dass hier eine wichtige Schnittstelle vorliegt. Bestehende Referenzstrukturen müssen durch optische Messverfahren in ein digitales Datenformat (z. B. Triple-Punktewolke) überführt werden.



Nebentechnologie

Im CAD-System erfolgt durch geeignete Algorithmen die datentechnische, möglichst abbildungsfehlerfreie Verknüpfung der Designstruktur mit der Bauteiloberfläche. Falls die Designstruktur kleiner als die Bauteiloberfläche ist, muss durch entsprechende Routinen eine großflächige Multiplikation der Strukturen erfolgen. Nun liegt ein mathematisch beschriebenes Datenmodell der herzustellenden Oberfläche vor. Die Generierung von NC-Bearbeitungsdaten für die nachfolgende Kerntechnologie erfolgt in einem CAM-System. Dazu müssen dem Anwender spezielle Bearbeitungsstrategien zur Verfügung stehen, die ein präzises und reproduzierbares Bearbeiten ermöglichen. Die zur Sicherstellung eines definierten Abtrags nötigen Fertigungsprozessparameter sind in einer Technologiedatenbank als sogenannte Laser-Tools zusammengefasst. Durch eine Anlehnung der Programmier-routinen an eine konventionelle Fräsbahngenerierung ist der Schulungsbedarf gering. Eine spezielle Software-Applikation überführt die definierten Bewegungsbahnen des Lasers und die nötigen Technologieparameter in entsprechende Steuerungskommandos der Laserstrahlstrukturieranlage. Diese stellt somit eine wichtige Schnittstelle zwischen CAx-Programmierung und Fertigungsprozess dar.

Kerntechnologie

Die Oberflächenbearbeitung erfolgt durch Sublimations-Laserstrahlstrukturieren. Ein spezielles Anlagensystem wird benötigt, das die entwickelten Bearbeitungsstrategien mit geeigneten Systemkomponenten umsetzt. Durch die Nutzung von optimierten Prozessparametern werden hohe Bearbeitungsgenauigkeiten und hohe Abtragraten gewährleistet. Die Forderungen nach hohen Maschinengenauigkeiten werden mit Hilfe von speziellen Kompensationsalgorithmen erfüllt. Das Maschinenkonzept nutzt am Markt erhältliche Systemkomponenten, so dass neben der einwandfreien Funktion eine hohe Robustheit und Wartungsfreundlichkeit sowie eine einfache Justagemöglichkeit vorliegt. Weiterhin sind Sicherheits- und Ergonomieaspekte berücksichtigt. Ein fehlertolerantes Gesamtsystem benötigt eine intelligente Steuerung, welche die Möglichkeiten der Maschinenkinematik sowie der Peripheriekomponenten vollständig ausnutzt.

Ausgangszustand

Nach dem Bearbeitungsprozess liegt eine strukturierte Werkzeugoberfläche vor und es kann somit eine Abformung erfolgen. Bei der Abformung auftretende Oberflächenfehler können aufgrund der vollständigen Datendurchgängigkeit der Prozesskette auf einzelne Kettenglieder zurückgeführt werden, so dass eine Prozessoptimierung zielgerichtet erfolgen kann.

Durch die durchgängige Prozesskette hat der Designer nun direkten Einfluss auf die von ihm erzeugten Designs, die Umsetzung erfolgt ohne weitere Zwischenschritte. Dieses eröffnet die Möglichkeit, zuvor nicht zu realisierende Strukturen auf Werkzeugoberflächen übertragen zu können. Weiterhin können Produkte schneller auf den Markt gebracht werden, da neben der Verkürzung der Produktentstehung auch erhebliche Zeiteinsparpotenziale in der Produktentwicklung bestehen.

Kernstrategie »3D-Segment-Prozess«

Die definierte Prozesskette soll in Form eines Maschinendemonstrators mit den dazu nötigen Komponenten, beginnend bei der Übertragung der Designstrukturen auf die Bauteiloberfläche im CAx-System über die NC-Datengenerierung bis hin zum Bearbeitungsprozess, umgesetzt. Für eine konturnahe, präzise und großflächige Strukturierung muss eine geeignete Kernstrategie für den Laserstrahlstrukturierprozess entwickelt werden. Die Kernstrategie hat dabei erhebliche Einflüsse auf die einzelnen Systemkomponenten und Schnittstellen.

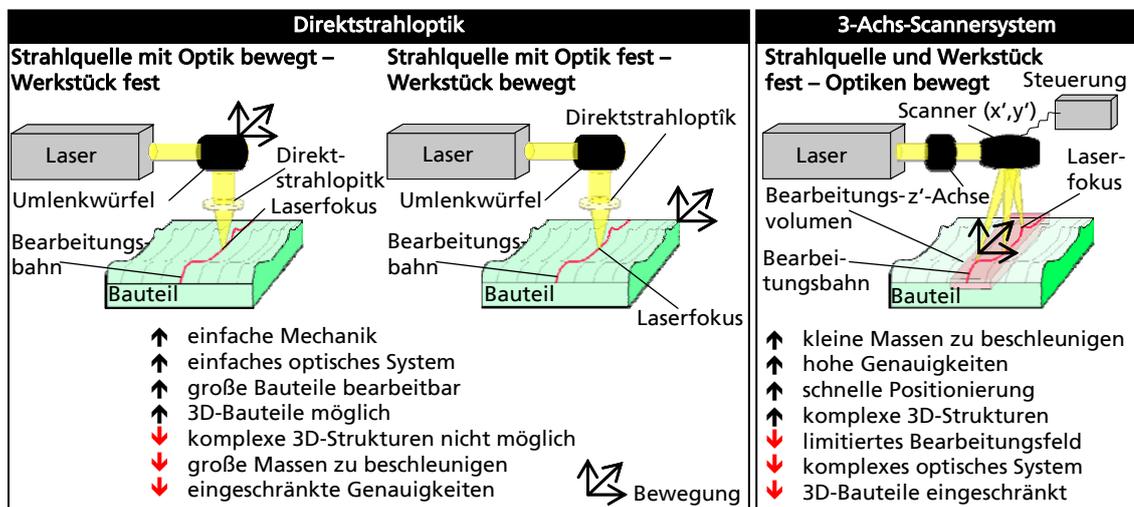


Abb. 5: Konventionelle Kinematiken beim Laserstrahlabtragen

Entscheidendes Merkmal aller Laserstrahlabtragprozesse ist die Kinematik der eingesetzten Laserstrahlfokussiereinheit in Kombination mit der verwendeten Bearbeitungsstrategie. Die Fokussierung des Laserstrahls kann als starre (Direktstrahloptik) oder als bewegliche Einheit (Galvano-Scanner mit separater Steuerung) ausgeführt werden. Daraus ergeben sich die in Abb. 5 dargestellten konventionellen Kinematiken/Strategien. Die hier geforderte Strukturierung kann jedoch nicht mit den beiden Kinematiken erfolgen. Dies ist vor allem auf die bestehenden systembedingten Restriktionen zurückzuführen.

Abb. 6 zeigt den neuartigen 3D-Segment-Prozess, der eine großflächige Bearbeitung von Freiformoberflächen mit filigranen und komplexen Strukturen bei deutlich reduzierten Bearbeitungsdatenmengen ermöglicht. Abb. 7 verdeutlicht die einzelnen Prozessschritte des 3D-Segment-Prozesses.

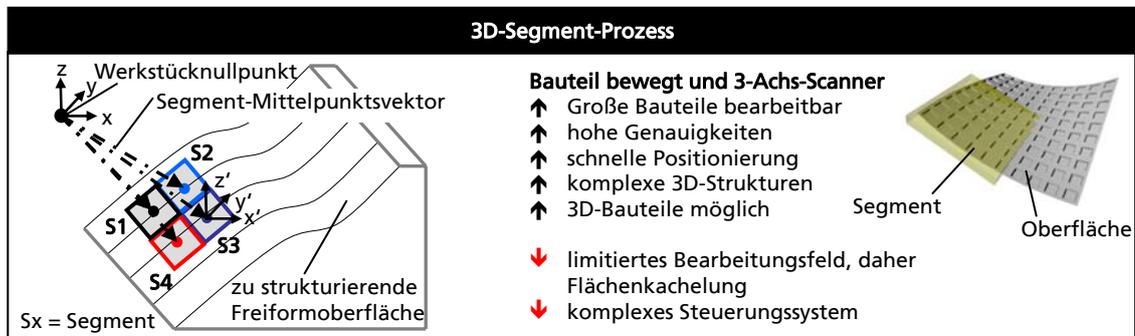


Abb. 6: Kernstrategie: 3D-Segment-Prozess

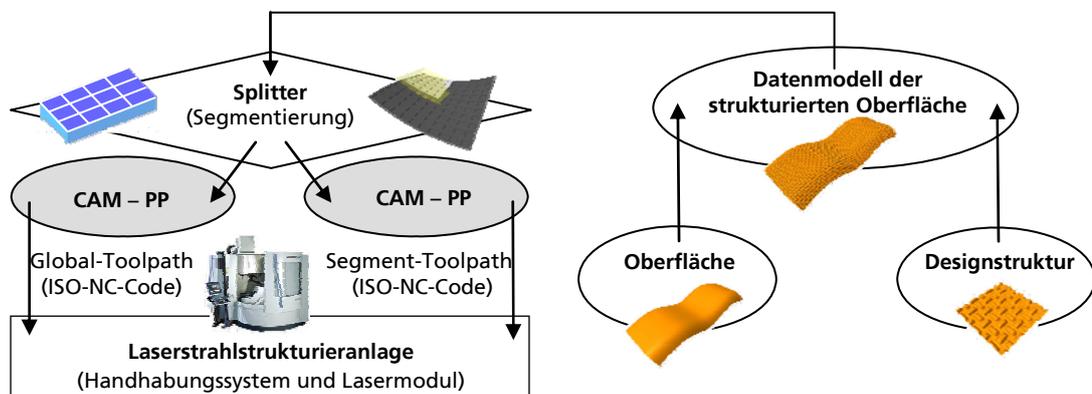


Abb. 7: Abfolge der Kernstrategie – 3D-Segment-Prozesses

Ausgangsbasis beim 3D-Segment-Prozess ist das Datenmodell der strukturierten Bauteiloberfläche, die eine Aufteilung in einzelne Oberflächensegmente (S_x) erfordert. Ein Segment wird eindeutig durch die Lage und Orientierung seines geometrischen Mittelpunkts in Bezug zum Werkstücknullpunkt und durch seine Abmessung festgelegt. Zur Aufteilung der Oberfläche wird eine Segmentierungsvorschrift (Splitter) eingesetzt, wobei die Größe und die Lage der einzelnen Segmente durch Strukturauflösung, maximale Arbeitsvolumengröße des Scanners sowie Oberflächengestalt bestimmen werden. Ein Handhabungssystem positioniert sequenziell die Segmente relativ zur Werkstückoberfläche, wobei die Bewegungsführungsdaten im so genannten Global-Toolpath vorliegen. Durch die Verwendung eines 3-Achs-Scanners können innerhalb der einzelnen Segmente präzise 3D-Strukturen hergestellt werden (Segment-Toolpath). Die sequenzielle Abarbeitung der einzelnen Segmente erfordert eine steuerungstechnische Verknüpfung des Scannersystems mit der Handhabungsanlage. Da nur jeweils die Bearbeitungsdaten für die einzelnen, in der Größe begrenzten Segmente berechnet und gehandhabt werden müssen, können auch großflächige, bis dato nicht herstellbare Bauteile mit Designstrukturen versehen werden.

7 Projektergebnisse in den Arbeitspaketen

7.1 Messtechnik

7.1.1 Aufnahme von Referenzstrukturen

Im Teilprojekt Messtechnik wurden zu Beginn der Projektlaufzeit Technologieuntersuchungen bzw. Einsatztests verschiedener Messverfahren durchgeführt. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag dabei in der Erfassung von Designvorlagen mit unterschiedlichen Strukturgeometrien (Abb. 8). Als Messverfahren kamen Mikrostreifenprojektionssysteme, der konfokale Linienscanner des Projektpartners Siemens, chromatische Sensoren und Weißlichtinterferometer zum Einsatz. Bei diesen Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass strukturierte schwarze Proben vor allem mit dem Mikrostreifenprojektionssystem in ausreichender Qualität gemessen werden können. Ein lichtstarker Projektor projiziert bei diesem Messverfahren eine Sequenz von unterschiedlich breiten Streifen auf den Prüfling, so dass ein ausreichend hoher Kontrast auch bei schwarzen Proben erreicht werden konnte. Weiterführende Untersuchungen und Vergleiche mit hellen, diffus reflektierenden Probenoberflächen haben jedoch gezeigt, dass das Signal-Rauschverhältnis der Messdaten deutlich verbessert werden musste.

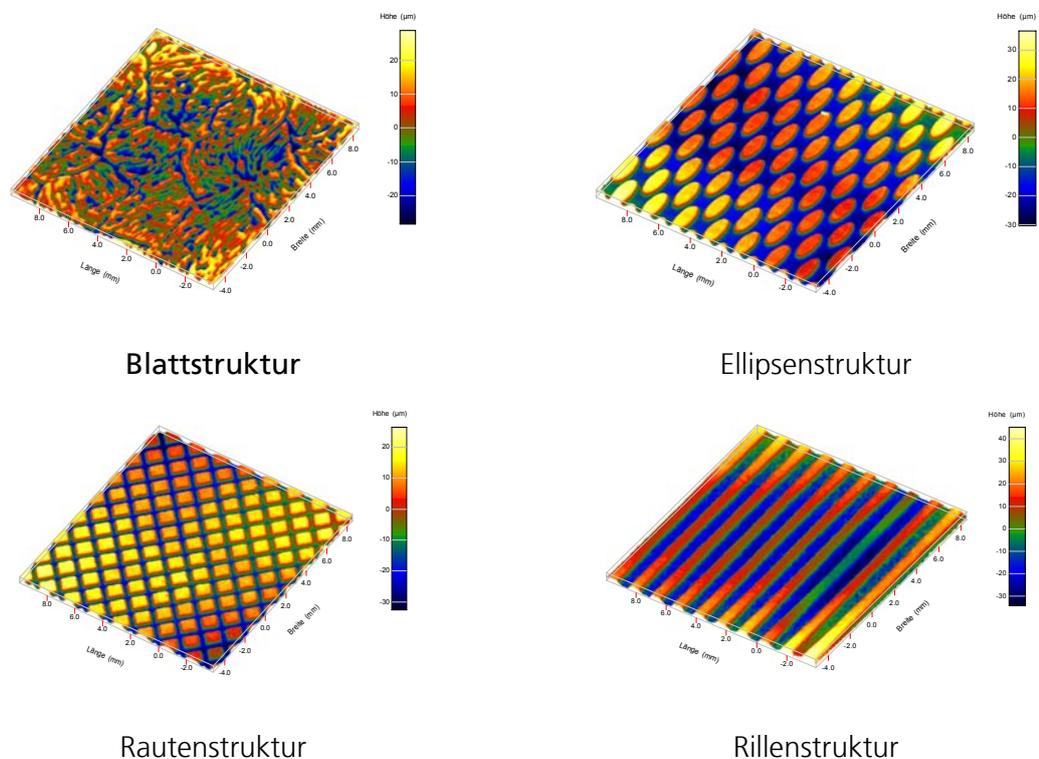


Abb. 8: Probemessung an verschiedenen technischen Designstrukturen

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden weitreichende Optimierungen am konfokalen Linienscanner des Projektpartners Siemens durchgeführt. Neben der Verdopplung der Kanalanzahl von 64 auf 128 Kanäle, sowie einer verbesserten Auflösung und Scan-Geschwindigkeit wurde insbesondere an der Optimierung des Dynamikbereichs und der Beleuchtungsintensität gearbeitet. Gerade letzte genannte Optimierungen ermöglichten im weiteren Projektverlauf das Messen auf nicht-kooperativen Oberflächen mit einem wesentlich verbesserten Signal-Rauschverhältnis (Abb. 9).

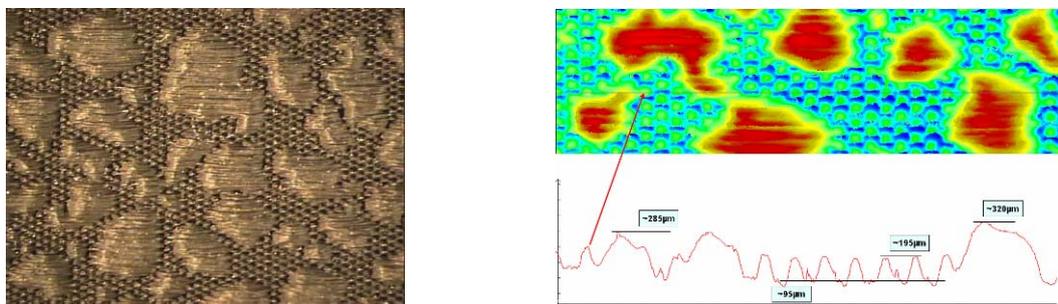


Abb. 9: Detailabbildung der »Narbstruktur« sowie entsprechende Messdaten

Nach Abschluss der Technologieuntersuchungen sowie der Sensoroptimierungen wurden anschließend verschiedene Schnittstellen zwischen Mess- und CAD/CAM-System realisiert mit dem Ziel die gewonnenen Messdaten als Eingangsinformationen sowohl für die NC-Bahngenerierung zu nutzen als auch für einen anschließenden Vergleich mit den neu erzeugten Strukturen auf dem Werkzeug. Zu diesem Zweck wurde eine Softwareschnittstelle zwischen dem SISCAN-System und einer kommerziellen Auswertungssoftware (MARK III der Fa. FRT GmbH) geschaffen. Nach Realisierung dieser Schnittstelle konnten die Daten gefiltert und in verschiedenen Formaten (z. B. Raumkoordinaten oder unterschiedliche Bildformate) der CAD-Arbeitsgruppe zu Verfügung gestellt werden. Insbesondere die Konzeption und Umsetzung von Algorithmen zur offsetfreien Darstellung der Messdaten, zur 2D-Fourier-Transformation und frequenzselektiven Filterung waren notwendig um langwellige Formabweichungen korrigieren zu können. Diese Formabweichungen lassen sich aufgrund der flexiblen Materialeigenschaften der Narbstrukturen nicht vermeiden, da die Proben nicht exakt eben gespannt werden können. Eine Darstellung der gemessenen Daten im CAM-System (Delcam ArtCAM) zeigt Abb. 10.

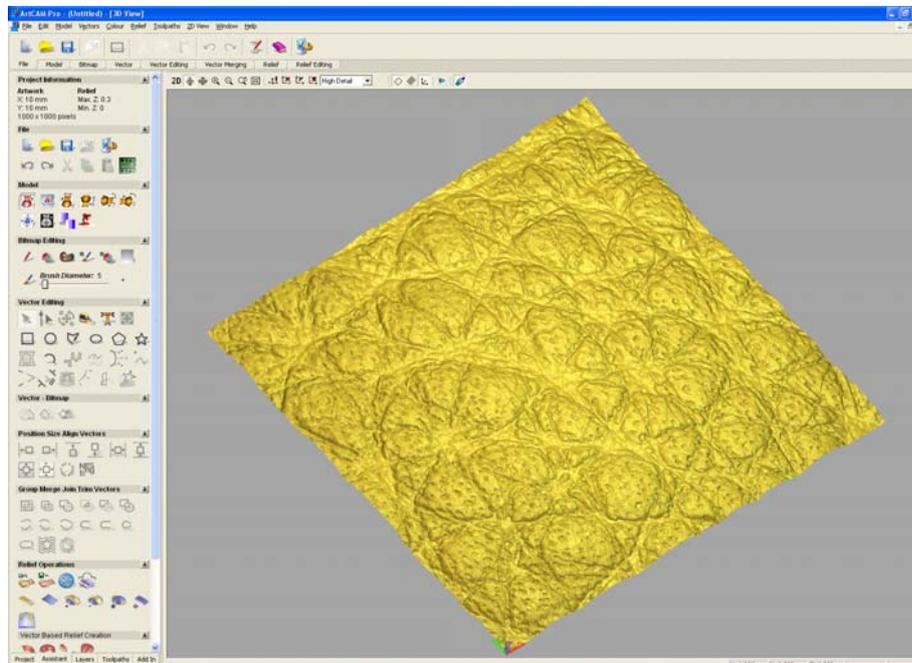


Abb. 10: Darstellung der gemessenen Narbstruktur in Delcam ArtCAM

7.1.2 In-Prozess Messtechnik: Makro

Eine weitere Herausforderung im Teilprojekt »Messtechnik« lag in der Erfassung der makroskopischen Werkzeugtopographie. Hierzu wurde von der Steinbichler Optotechnik GmbH mit Unterstützung des Fraunhofer IPT ein leistungsfähiger, optischer Messsensor entwickelt, der die Vorzüge eines punktuell arbeitenden Lasertriangulationssensors mit den Vorzügen eines Lichtschnittsensors vereint. Die Vorzüge dieses Sensorkonzepts können wie folgt zusammengefasst werden:

- Weitestgehende oberflächenunabhängige Messwernerfassung durch punktuelle Intensitätsreglung des Messstrahls. Schlecht reflektierende Objektpunkte können durch eine Erhöhung der Laserintensität ausgewertet werden. Ein Übersteuern des Signals aufgrund hoher Oberflächenreflektivität kann durch eine Intensitätsverringerng vermieden werden.
- Realisierung hoher Messfrequenzen durch Verwendung von Zeilenkameras
- Vollständige mechanische und informationstechnische Integration in die Werkzeugmaschine

Die mechanische Integration des Sensors in die Werkzeugmaschine wurde auf Basis vorhandener standardisierter Maschinen-Schnittstellen durchgeführt, so dass das Einwechseln des Sensors einem regulären Werkzeugwechsel gleichkommt. Durch die Verwendung der bestehenden HSK-Schnittstelle beispielsweise ist es

ohne zusätzlichen Integrationsaufwand möglich, alle zur Verfügung stehenden Maschinenachsen für den Messprozess zu nutzen. Damit der Sensor der Aufgabe entsprechend seine Position und Orientierung im gesamten Maschinenvolumen anpassen kann, stehen ihm im Falle der verwendeten 5-Achs-Fräsmaschine fünf Freiheitsgrade direkt zur Verfügung. Durch Integration des Sensors in die Werkzeugmaschine erfolgt die quantitative Erfassen der Werkzeug-Topographie somit ohne zusätzliches aus- oder umspannen des Werkstücks (Abb. 11).

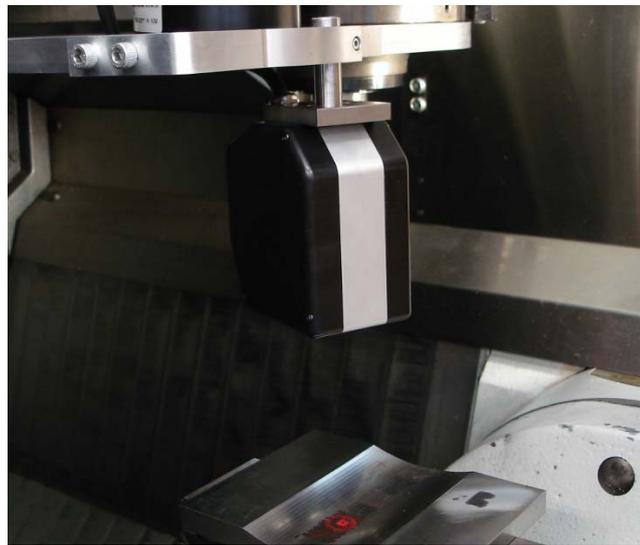


Abb. 11: Maschinenintegrierter Sensor

Die steuerungstechnische Integration beinhaltet den Betrieb sowie die daten- und signaltechnische Anbindung aller elektronischen Komponenten des Messsystems an die Werkzeugmaschine. Folgende Aspekte wurden dabei berücksichtigt:

- Bereitstellung der aktuellen TCP-Position der Maschine
- Berechnung der Messdaten im Sensor-Koordinatensystem
- Synchronisation der Datenströme von Sensor und Maschine
- Bereitstellung von Ressourcen für die Koordinatentransformation
- Bereitstellung von Triggerfunktionalitäten
- Kommunikation zur Anpassung der Sensorparameter

Diese Teilaufgaben können prinzipiell durch eine vollständige Integration aller Funktionalitäten in die NC-Steuerung gelöst werden. Aufgrund des gewählten modularen Ansatzes, welcher die Adaption auf verschiedenen Maschinenkinematiken und NC-Steuerungen ermöglichen soll, wurde eine Lösung auf der Basis externer vernetzter Rechnersysteme bevorzugt (vgl. Abb. 12).

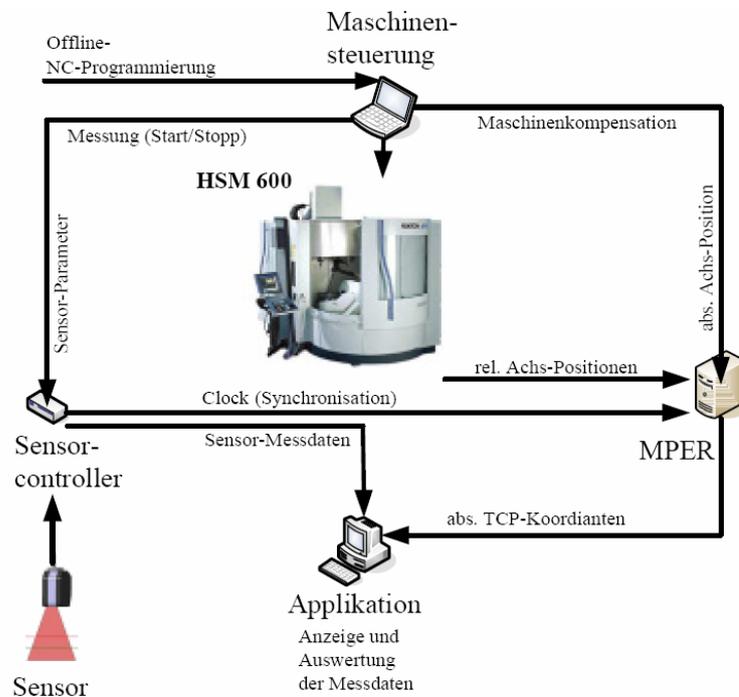


Abb. 12: Konzept der informationstechnischen Integration des Sensors

Ein weiterer Vorteil dieser Lösung liegt in der Unabhängigkeit von Maschinensteuerung und Messprozess. Mit der dezentralen steuerungstechnischen Realisierung durch einen externen Messrechner wird die gesamte vom Messrechner gesteuerte Kommunikation aus dem NC-Programm gestartet. Darüber hinaus dient dieser Rechner als Plattform für die Messsoftware und stellt somit die CPU-Leistung und den Hauptspeicher für die Transformation der Messdaten in das Werkstück-Koordinatensystem zur Verfügung. Des Weiteren ermöglicht er eine Online-Filterung der Messdaten, wodurch qualitativ hochwertige Messdaten sichergestellt werden können. Das Messsystem ist durch diese Form der Realisierung unabhängig vom Typ der NC-Steuerung und dessen Betriebssystem. Ein weiterer Bestandteil der steuerungstechnischen Integration stellt die Ermittlung der aktuellen Sensorpositionen im Maschinenvolumen während der Messung dar. Maschinensteuerungen, die standardmäßig zur Fräsmaschinenansteuerung ausgelegt sind, haben in der Regel keine Echtzeitschnittstelle, um externen Geräten die aktuelle Es ist deshalb erforderlich, dass alle Achspositionen der Maschine noch vor der Steuerung abgegriffen werden. Eine echtzeitfähige und damit sehr leistungsfähige Möglichkeit zur Positionsbestimmung besteht im parallelen Auslesen der maschineneigenen, inkrementalen Wegmesssysteme durch einen externen Positionserfassungsrechner (vgl. Abb.13). Führende Hersteller von Wegmesssystemen bieten hierzu Auswerteeinheiten in Form kompakter und preisgünstiger PC-Zählerkarten an. Die hier betrachtete Fräsmaschine »Mikron HSM600« ist mit Inkrementalmaßstäben der Firma Heidenhain ausgestattet. Um die Funktionsicherheit der maschineneigenen Wegmesssysteme zu gewährleisten, ist auf eine voll-

ständige Entkopplung sowohl der internen als auch der externen Auswerteeinheit durch eine elektronische Y-Weiche zu achten (vgl. Abb. 13).

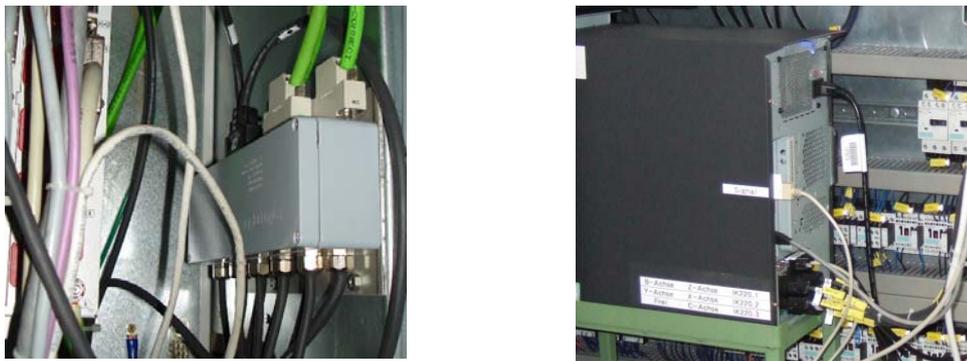


Abb. 13: Weiche und Positionserfassungsrechner

Im Rahmen der durchgeführten Messunsicherheitsanalyse wurde eine Messgenauigkeit von $30\mu\text{m}$ ($\pm\sigma$) nachgewiesen. Hinsichtlich der wesentlich kritischer zu bewertenden Maschinenintegration des konfokalen SISCAN-Sensors von Siemens wurde eine Simulationsumgebung zur genaueren Analyse des Einflusses von Maschinenschwingungen auf die zu erwartende Messunsicherheit geschaffen (Abb. 14).

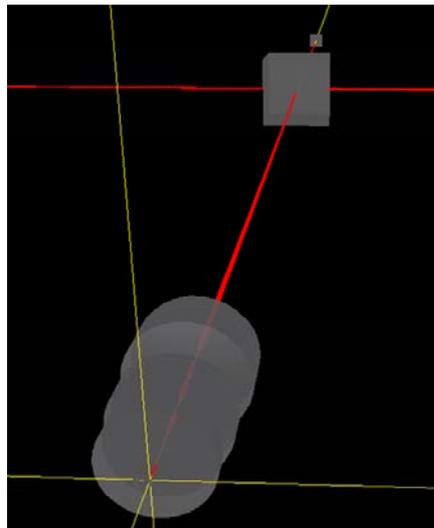


Abb. 14: Simulation der konfokalen Messprozesse

Vibrationen stellen bei der produktionsintegrierten Messtechnik ein großes Problem dar. Durch Vibrationen der Maschine, auf der gemessen wird, aber auch von benachbarten Produktionsmaschinen kann es zu Verfälschungen des Messergebnisses kommen. Dies gilt vor allem bei Messungen von Strukturen im Mikro- und Sub-Mikrometerbereich, da in diesem Fall das zu messende Objekt in einer ähnli-

chen Größenordnung wie die Amplitude der Schwingung liegt. Unterschieden werden muss dabei zwischen hoch-, nieder- und mittelfrequenten Vibrationen. Der Einfluss der Vibrationen ist dabei stark vom Verhältnis von Integrationszeit der CCD-Kamera zu der Periode der Schwingungen abhängig. Für hochfrequente Vibrationen ist die Integrationszeit sehr viel größer als die Periodendauer. Damit entsteht auf der CCD-Kamera ein Bild über mehrere Perioden, so dass der Lichtpunkt zwar größer und etwas unschärfer wird, die mittlere Position des Reflexes bleibt jedoch an der richtigen Stelle. Diese Vibrationen haben also einen eher vernachlässigbaren Einfluss auf das konfokale Messergebnis. Niederfrequente Vibrationen hingegen haben einen sehr viel größeren Einfluss auf das Messergebnis. Die Messung erfolgt dabei nur über einen kurzen Teil der Schwingperiode, so dass keine Mittelung der Abweichung erfolgt. Die Position der Nut kann damit während der Messung lateral leicht um einige μm variieren. Bei Strukturgrößen von $125\ \mu\text{m}$ kann die exakte Position der Struktur also nicht bestimmt werden. Eine Verschiebung entlang der optischen Achse mit einer ähnlich großen Amplitude würde verhindern, dass die Fokusebene, und damit die Höhe der Nutspitze, genau bestimmt werden kann. Einen ähnlich großen Einfluss können mittelfrequente Vibrationen haben. Sobald die Schwingungsdauer größer wird als die Integrationszeit, geht der Effekt immer mehr in Richtung der niederfrequenten Vibration und ist damit problembehaftet. Um eine Mittelung über die Schwingungen auch für den Einfluss von mittel- und niederfrequenten Vibrationen zu erreichen, müssten viele Messungen an der gleichen Position durchgeführt werden, wodurch der Zeitanteil der Messungen während der Produktion deutlich zunehmen und die Produktionsdauer verlängert würde. Aufgrund dieser prinzipiellen Probleme musste auf die Integration des konfokalen Sensors verzichtet werden. Die Qualitätskontrolle der strukturierten Probe erfolgte jedoch fertigungsbegleitend durch eine implementierte In-Line-Messtechnik. Hierzu wurde das SISCAN-System der Fa. Siemens gekapselt und schwingungsentkoppelt betrieben.

7.2 Design der Strukturen im CAD

7.2.1 Entwicklungstrends in der Oberflächengestaltung

In der Automobilindustrie lässt sich vermehrt beobachten, dass sich eine Tendenz zu mehr Individualität abzeichnet und das Fahrzeuginterieur immer bedeutender wird [SIEL03, S.6]. So fordert der Kunde eine stärkere Individualisierung auch des Fahrzeuginnenraums [NOIS02]. Bedingt durch ein breites Angebot für die Wahl der Innenausstattung ist der Kunde anspruchsvoller und sensibler geworden [SIEL03, S. 3]. Er wünscht sich eine Ausstattungsvielfalt, aus der er ganz individuell das herausgreifen kann, was seinem Geschmack und seiner Persönlichkeit am nächsten kommt und legt dabei besonderen Wert auf die gute Verarbeitung von edlen Materialien [SIEL03, S. 7]. Ohlinger [OHLI01, S. 5] beschreibt die Entwicklung der Oberflächenqualität von Bauteilen des Fahrzeuginnenraums der letzten Jahre mit folgenden Merkmalen:



- Steigerung der Wertanmutung durch Materialauswahl und verbesserte Narbqualität,
- Bauteil- und Herstellerübergreifende Harmonisierung von Narben und Farben im Fahrzeuginnenraum,
- Fahrzeugspezifische Narbgestaltung,
- Entwicklung von neuen Narbstrukturen mit Hilfe der Lasertechnologie,
- Optische Aufwertung von Kleinfahrzeugen durch prägnante technische Narben und
- Darstellung einer neuen Oberflächenwertigkeit auf Basis von Kunststoffmaterialien (Neue Strukturen (Lasertechnologie) erlauben eine „ideale“ Kombination von Narbe und Material).

Darüber hinaus übernehmen Trägermaterialien neue, für den Endkunden nicht wahrnehmbare, Funktionen. Im Hinblick auf die Optik wird eine „unsichtbare“ Airbag-Integration zum Standard und textile Oberflächen und Leder werden für den Strukturierer zur Herausforderung [KERK02, S. 16].

Im Bereich der Lacksysteme hat König [KÖNI05] ein innovatives Verfahren zur Erzielung der Lederoptik entwickelt. Unter Nutzung der Erkenntnisse aus der Reißlacktechnik wird mit herkömmlichen Hydrolacken und einem Aktivator auf wasserlöslicher Basis eine Oberfläche in Lederoptik auf Kunststoff, Metall oder anderen Materialien realisiert. Der Lackauftrag wird auf der glatten Oberfläche des Werkstücks realisiert, sodass die Lederstruktur im Prozess der Beschichtung erzeugt wird. Eine Vorstrukturierung der Oberfläche durch entsprechende Kunststoff-Spritzgussformen ist nicht mehr erforderlich.

7.2.2 Benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

Das Internet bietet eine Reihe von Möglichkeiten, sich über das breite Feld der Kunststofftechnik zu informieren. Neben Fachinformationen zu Kunststoffen allgemein und unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren im Speziellen, präsentieren sich Firmen, dessen Hauptaufgabengebiet das Strukturieren von Kunststoffoberflächen ist.

Im Folgenden werden die Firmen kurz vorgestellt, die für dieses Projekt nützliche Informationen bereitstellen.

Unternehmen im Bereich Oberflächenstrukturierung

Eschmann Textures International GmbH, Gummersbach

Das Unternehmen Eschmann Textures International GmbH befasst sich einerseits mit der Einbringung der Narbung in das Werkzeug und andererseits mit der Bera-

tion in allen Fragen der Oberflächenstrukturierung. Neben der Entwicklung von Konzepten zur Oberflächenstrukturierung werden zusammen mit dem Kunden innovative Oberflächen für höchste Ansprüche an Ästhetik, Design und Funktionalität entwickelt. Für weitere Informationen siehe Internetauftritt der Firma unter URL: <http://www.eschmanntextures.de> [20.01.2006].

Mold-Tech, Markenname der Engraving Group (EG) der Firma Standex, Krefeld

Ähnlich wie die Firma Eschmann Textures befasst sich Mold-Tech mit Oberflächenbearbeitungstechniken. Verfahren wie z. B. Texture Repair, Conventional Texturing, Custom Texturing, Accugrave® und Dimension-Tech werden angewandt. „Mold texturization is an art science that combines the skill of trained artisans and the sciences of chemistry and metallurgy. It produces chemically etched three-dimensional decorative and functional finishes into the surfaces of ferrous and non-ferrous metal molds that are used to mold plastics and die cast parts.“ Für weitere Informationen siehe folgende Internetseiten: <http://www.mold-tech.com/texturing/1tex.shtml> [20.01.2006] und http://www.standex.com/standex_Engraving.htm [20.01.2006].

J.&F. Krüth GmbH, Form-Ätz-Technik, Solingen

Die Firma J.&F. Krüth beschäftigt sich neben dem Narben von Spritzgusswerkzeugen und der Narbentwicklung u. a. mit Werkzeugreparaturen, Musterplattenerstellung, Oberflächenmessungen und Beschichtung. Leder-, Textil- und Erodierstrukturen, Holzmaserungen, technische- und geometrische Muster oder auch Phantasienarbnungen setzt man bei J.& F. Krüth mit Repro-Kameras und Grafikcomputern um. Dadurch ist die schnelle Bearbeitung von Grafiken, Texten und Beschriftungen jeder Art stets gewährleistet. Um eine Struktur im Negativ in eine Metalloberfläche einzubringen, wird bei J.& F. Krüth ein chemischer Ätzprozess eingesetzt. Für detaillierte Informationen siehe Internetauftritt der Firma unter URL: <http://www.fotorelief.de/start.htm> [20.01.2006].

7.2.3 Oberflächendesignstrukturen: Überblick

Die Beschaffenheit einer Materialoberfläche trägt entscheidend dazu bei, ob die Oberfläche eines Produkts vom Nutzer als eher angenehm oder unangenehm empfunden wird, wenn sie mit den Händen berührt wird. So werden oftmals berührungsfreundliche Bereiche auf glatten Kunststoffteilen mit Narben versehen. Diese verleihen einem glatten Kunststoffteil ein ästhetisches, angenehmes Aussehen. Zudem lässt eine bessere Optik es wertvoller erscheinen: „Das Oberflächendesign von Produkten trägt maßgeblich zu deren empfundener Wertigkeit bei“ [KRÜT05] (Ausführliche Eigenschaften von Oberflächenstrukturen s. Kapitel 6.2.5). So werden für Kraftfahrzeugteile überwiegend feine Ledernarben, technische Narben und gleichmäßige Strukturen eingesetzt. Radien und Kanten der Bauteile im Fahrzeuginnenbereich sollten prägnant sein und damit Präzision in der Ausführung vermitteln [NEBE01]. Mit Narben versehene Teile sind kratz- und griffunempfindlicher als glatte Kunststoffteile. Zudem können mit genarbnen Oberflächen Fließlinien, Wirbel, Einfallstellen und andere durch das Fertigungsverfahren bedingte Unregelmäßigkeiten vermindert oder ganz ausgeglichen werden. Diese

Unregelmäßigkeiten lassen sich beispielsweise mit Zuhilfenahme der Laserstrahltechnologie verringern bzw. vermeiden. So kann aufgrund des flexiblen Werkzeugs „Laserstrahl“ ein komplettes Werkzeug bearbeitet werden. Teilweise sind aber auch nur Teilbereiche eines Werkzeugs bearbeitbar. Gegenüber den konventionellen Verfahren werden deutliche Zeit- und Kosteneinsparungen erzielt, die Bauteilqualität wird gesteigert und erweiterte Anwendungsgebiete werden erschlossen. Zudem kann die Produktqualität durch den Wegfall einer manuellen Nachbearbeitung von Schnittkanten (Werkzeugherstellung mittels Abformvorgängen) erhöht werden. Verschleißbedingte Qualitätseinbußen gibt es mit dem Werkzeug „Laserstrahl“ nicht und die Betriebskosten der Technologie sind gut kalkulierbar. Eine hohe Reproduzierbarkeit ist garantiert, so dass eine Serienproduktion von identischen Werkzeugen mit gleicher Narbung erfolgen kann.

Neben der Recherche und Analyse bestehender und zukünftiger Oberflächendesignstrukturen in den Bereichen „car interieur“ und „mobile communication“ bildet die Entwicklung neuartiger Strukturen in Form und Funktion das Hauptaufgabengebiet des Designers. Einerseits werden bestehende Strukturen mithilfe einer eigens entwickelten Software zu verwertbaren Daten für den CAD-Formenbauprozess umgewandelt. Andererseits können mit dieser Software auch neue Oberflächendesignstrukturen dreidimensional entwickelt bzw. bereits vorhandene Strukturen verändert werden. So ist eine nahtlose Kachelung einer Struktur bei größeren Flächen garantiert.

Aus Sicht des Designers werden Narbungen hinsichtlich ihrer Optik, Haptik, Funktionalität, Akzeptanz und Herstellung charakterisiert und katalogisiert. Eine alternative Katalogisierung von Oberflächendesignstrukturen ist innerhalb des Forschungsprojekts als Strukturkatalog im Internet realisiert worden (siehe Internetauftritt unter URL: <http://www.strukturkatalog.de>). Dieser Katalog stellt in der vorliegenden Form ein Novum dar (siehe hierzu Kapitel 6.6).

7.2.4 Aufbau von Oberflächendesignstrukturen

Der Aufbau von Oberflächendesignstrukturen ist abhängig von den unterschiedlichen Materialeigenschaften. „Betrachtet man zum Beispiel ein Stück grobes Leder, so baut sich die Struktur aus groben und feinen Linien auf, die sich an manchen Stellen bündeln oder nebeneinander herlaufen, sowie großen [sic!] und kleinen Punkten“ [WIED79]. Die aufgeführten Beispiele zeigen Unterschiede in der Struktur von Oberflächen bei Echtleder (Abb. 15).

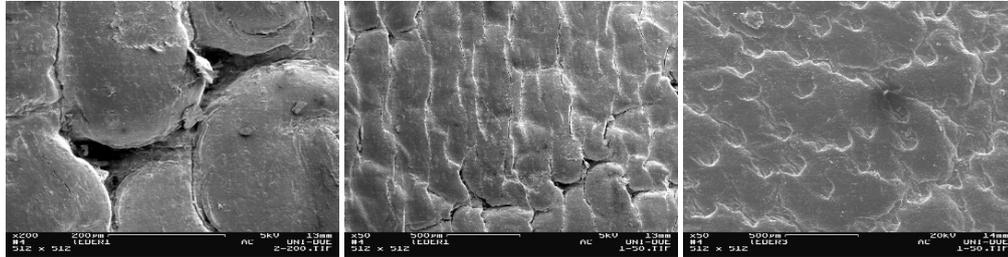


Abb. 15: Unterschiedliche Echtleidernarben, REM-Vergrößerung 1:200; 1:50; 1:50
Die Erstellung einer künstlichen Ledernarbung wird in Kapitel 7.2.13 beschrieben.

7.2.5 Einteilung der unterschiedlichen Oberflächendesignstrukturen

Oberflächendesignstrukturen wie z. B. Imitationen von Naturprodukten wie Leder in allen Variationen, Holz mit all seinen Eigenheiten, technische Gegenstände wie Riffelblech auf Spielzeugteilen, Nähte in Würfelbechern usw., geometrische Muster und Phantasiedesign [WIED79, S. 16] lassen sich folgenden Gruppen zuordnen: Echtleiderstrukturen, Erodierstrukturen, Geometrische Strukturen, Technische Strukturen, Holzstrukturen, Textilstrukturen, Logos und Schriften Die folgenden Beispiele zeigen anhand einer Echtleiderstruktur, einer geometrischen Struktur, einer Holzstruktur und einer Textilstruktur die unterschiedlichen Beschaffenheiten von Oberflächen (Abb. 16).

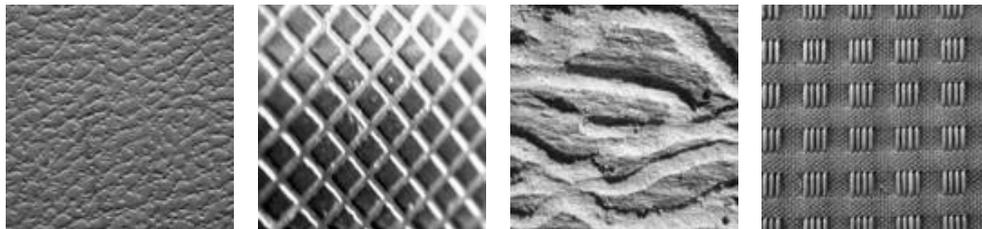


Abb. 16: Unterschiedliche Strukturen: Echtleider, geometrische Struktur, Holz, Textil (Quelle: IED)

7.2.6 Einsatzgebiete von Oberflächendesignstrukturen

Oberflächendesignstrukturen findet man auf geformten Teilen für den Fahrzeuginnenraum und auf Kunststoffgehäusen für Maschinen und Geräte. „Je nach Anwendungsbereich wird man für Kraftfahrzeugteile überwiegend Ledernarbungen, für Möbel und Lampenteile Holzimitationen, für Büro- und Haushaltsmaschinen neutrale, putzfreundliche und unempfindliche Strukturen wählen“ [WIED79, S. 16].

Die Automobilindustrie hat in den letzten Jahren häufig technische Strukturen im Innenraum ihrer Fahrzeuge eingesetzt. Inzwischen ist – je nach Fahrzeugklasse, eine Tendenz zu feinen und sehr hochwertig anmutenden Echtleiderstrukturen erkennbar. Es wird Wert auf einheitliche und ruhige Innenräume gelegt und auf

exakte Spaltmaße, saubere Radienführung und unauffällige Werkzeugtrennungen geachtet [KRUE05, S. 41]. Mehr und mehr entwickelt sich die Innenraumgestaltung zum Entscheidungsträger für den Kauf eines Fahrzeugs [MITZ04, S. 180]. Die Instrumententafel, an die sich Mittelkonsole und Türverkleidungen anschließen, ist im Innenraum das beherrschende Element. Folglich sind hier die Anforderungen sehr hoch. Die Ansprüche und Erwartungen an die Narbqualität steigen von Herstellerseite permanent, die Reproduzierbarkeit der in der Gestaltungsphase generierten Struktur wird somit unablässig.

7.2.7 Anforderungen an Oberflächendesignstrukturen und Funktionen von Oberflächendesignstrukturen

Immer häufiger werden vom Kunden strukturierte Oberflächen gewünscht, da sie einerseits natürlichen Werkstoffen wie Holz, Leder, Geweben, Kristallen u. a. ähnlich sind und andererseits damit eine Höherwertigkeit assoziiert wird [SCHA94]. Kunden beurteilen die meisten Kunststoffteile zwar in erster Linie visuell, aber in der Regel erfolgt auch eine haptische Überprüfung. Was der Kunde dann fühlt, trägt wesentlich zu seinem Urteil über das Produkt bei: „Immer dann, wenn er die erwartete Oberfläche nicht fühlt, mindert sich auch sein Qualitätseindruck. Dies gilt für die harte Lederoberfläche eines Kunststoffteils. Ätztechnisch lässt sich hier keine Abhilfe schaffen. Die Auswahl des Kunststoffs kann die Haptik leicht verbessern. Es bieten sich an dieser Stelle aber hauptsächlich nachträgliche Behandlungen wie (...) Lackieren mit Softlack an“ [KRÜT05, S. 41]. Ohlinger [OHLI01] verdeutlicht, dass mechanische Stabilität und Alterungsstabilität in Licht und Wärme bei allen eingesetzten Oberflächenmaterialien als selbstverständlich vorausgesetzt werden. „Die Gebrauchstüchtigkeit von Oberflächen ist nicht nur materialabhängig, sondern wird auch von der Oberflächenstruktur beeinflusst. Hier können Grenzen für optisch ansprechende Oberflächenstrukturen liegen, wenn z. B. bei tiefen Narbungen die Reinigung erschwert wird und die Oberflächen während der Nutzungsdauer unansehnlich werden“ [OHLI01, S. 1]. Noisternig [NOIS02, S. 1] hat in Untersuchungen herausgefunden, dass der „Oberfläche eines Fahrzeuginnenraums (...) eine immer größere Bedeutung [zukommt, d. Verf.], da alle sichtbaren Flächen und Komponenten dem Hauptzweck dienen, dem Insassen ein Höchstmaß an Wohlbehagen zu vermitteln“. Die Individualisierung führt zu einer ständig steigenden Anzahl von Fahrzeugsegmenten und zu immer mehr Ausstattungsvarianten speziell für den Innenraum [NOIS02, S. 1]

7.2.8 Optische Anmutung

Ein ästhetisches und ansprechendes Äußeres sind die Hauptanforderungen, die an eine Narbung gestellt werden. Durch das Ausschalten fertigungstechnischer Schwierigkeiten wird sichtbare Qualität deutlich [WIED95, S. 12]. Noisternig [NOIS02, S. 1] hebt hervor, dass zu einem „hohen Qualitätseindruck maßgeblich die einheitliche visuelle Beschaffenheit wie Narbung und Glanz sowie Farben beitragen. Zudem erwecken „matte Farben (...) einen höheren Qualitätseindruck von Solidität und Substanz“.

Darüber hinaus besitzt das Reflexionsverhalten aufgrund der heute stark geneigten Glasfrontscheiben einen hohen Stellenwert [OHLI01, S. 1].

Die Automobilindustrie setzt vermehrt Echtmaterialien mit „authentischer Oberflächenanmutung“ im Innenraum ein. Bislang kaum verwendete Werkstoffe wie Granit, Horn, Kork und Naturfasern im Sichtbereich werden für die industrielle Fertigung entwickelt [KERK02, S. 8]. Ebenso ist ein „Trend (...) hin zu Purismus und technischer Anmutung“ [WEHA02, S. 6] zu spüren. Metallisch wirkende Oberflächen ohne Struktur werden befürwortet. In diesem Bereich findet eine Oberflächengestaltung mit Hilfe von Lackierung, Metallisierung und Galvanisierung, Folienhinterspritztechnik und Heißprägefoliertechnik [WEHA02, S. 14] statt.

Zusammenfassend sind folgende Merkmale für eine positive optische Anmutung unabdingbar: Narbstrukturen in Form von feinen Ledernarben, technischen Narben, gleichmäßigen Strukturen, Mehrfarbigkeit, Zweiglanzeffekte, ein gutes Reflexionsverhalten und eine authentische Oberflächenanmutung. Des Weiteren weist Mitzler [MITZ04, S. 18] auf das Vermeiden eines Dekor- und Narbungsverzugs hin. Im Rahmen der Designentwicklung sind neben einem optisch ansprechenden Äußeren häufig noch weitere Aspekte von entscheidender Bedeutung: ein angenehmes Griffgefühl, die Kratzunempfindlichkeit einer Oberfläche, die Reinigungsfreundlichkeit einer Oberfläche, der Glanz einer Oberfläche und die technischen Voraussetzungen des Werkzeugs für beispielsweise das Ätzen einer bestimmten Struktur wie z. B. Entformungsschrägen, Politur und Materialabtrag.

7.2.9 Haptische Anmutung

Eine fühlbare Qualität der Produkte ist den Kunden heutzutage immer wichtiger: „Ein maßgeblicher Parameter für die Qualitätsempfindung ist die Haptik, die sinnliche Wahrnehmung: Das Material sollte auf Druck leicht nachgeben – einen progressiven Eindruckwiderstand aufweisen; streicht man mit dem Finger über die Oberfläche, muss ein trockenes, warmes Wärmegefühl spürbar sein – ein Ledergefühl eben“ [NOIS02, S. 1]. So verändert eine wachsende Bedeutung der Haptik beispielsweise die Gestaltung des Fahrzeuginnenraums nachhaltig. „Einzigartige angenehme Haptik mit einer natürlichen Struktur wecken Emotionen und vermitteln ein Gefühl der Wertigkeit. (...) Was die Optik verspricht, muss beim Anfassen auch fühlbar sein“ [KÖNI05, S. 1]. Die angenehme Haptik und der Matierungseffekt geben dem Kunden das Gefühl, kein minderwertiges Produkt bzw. „Plastikbauteil“ [MITZ04, S. 180] gekauft zu haben. Der oben beschriebene Polstereffekt, ein trockener Griff bzw. Weichheit und Griffverhalten [OHLI01] und kein „Plastik-Touch“ [NEBE01] tragen zu einer anmutigen Haptik der Bauteiloberfläche bei [MITZ04, S. 181]. „Neben Eigenschaften wie hart und weich oder kalt und warm fühlt sich eine Oberfläche auch glatt oder rau an. Eine samtartige, feine Rauigkeit [sic!] wird meist als angenehm, eine gröbere, picklige Rauigkeit [sic!] als unangenehm empfunden. Hier ist schon bei der Narbentwicklung darauf zu achten, dass optische und haptische Eigenschaften (...) einen gleich wichtigen Einfluss haben“ [KRÜT05, S. 41].



7.2.10 Gebrauchseigenschaften

Zu den Anforderungen an Oberflächendesignstrukturen in Bezug auf Gebrauchseigenschaften zählen einerseits mechanische und thermische Stabilität, ein gutes Verschmutzungs- und Reinigungsverhalten, Alterungsstabilität in Licht und Wärme und andererseits eine hohe Kratzunempfindlichkeit und Eignung für komplexe, stark dreidimensionale Oberflächen mit engen Radien und Durchbrüchen [OHLI01], [MITZ04, S. 181].

7.2.11 Technische Funktionen

Als Anforderung an Oberflächendesignstrukturen im Hinblick auf technische Funktionen ist zu erwähnen, dass strukturierte Oberflächen je nach Rautiefe und Rauigkeitsverlauf größere Entformungsschrägen als polierte Formnestkonturen erfordern. Sind die Entformungsschrägen zu gering oder ist die Werkzeugsteifigkeit mangelhaft kann es zur Deformation der Oberflächenstruktur des Formteils bei der Werkzeugöffnung kommen [SCHA94, S. 1]. Hier ist von großer Bedeutung, dass sich die Änderung der Narbstruktur innerhalb einer Struktur stufenlos realisieren lässt.

„Technisch betrachtet sollten Oberflächen im Automobilbereich vor allen Dingen reinigungsfreundlich sein. (...) Im Innenraum sind Staub und von außen hereingetragener Schmutz, aber auch Haut- und Kleidungsabrieb die Hauptursache für Verschmutzungen“ [KRÜT05, S. 41].

Eine weitere technische Anforderung an Oberflächenstrukturen stellt die Lackierbarkeit der Narbung dar. „Gerade wenn Teile zu lackieren sind, ist eine Struktur nötig, die optisch gut aussieht und trotzdem so fein ist, dass sie eine Lackierung überdecken kann“ [KRÜT05, S. 41]. Oberflächen werden aus haptischen Gründen mit Softtouchlack versehen, um einer harten Kunststoffebene eine weichere, haptische Anmutung zu verleihen. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass im Bereich von Ätzungen aufgrund der Tatsache, dass Ätzungen undefinierte Flankenwinkel aufweisen und der Ätzgrund sich leicht rund ausbildet, Figuren wie Pyramiden, Kegel oder definierte Noppen nicht oder nur mit deutlichen Abstrichen darzustellen sind [Krüth05, S. 41].

Mit dem Ziel ein insgesamt formvollendetes und mit einer angenehmen Oberflächendesignstruktur versehenes Produkt für den Endkunden zu generieren, sollten Form, Optik und Haptik gleichermaßen betrachtet werden.

7.2.12 Vorteile von Oberflächendesignstrukturen

Kunststoffoberflächen werden sowohl aus funktionalen und dekorativen Gründen als auch zur Verdeckung von Mängeln strukturiert. So werden Fließlinien, Wirbel, Einfallstellen und andere durch das Fertigungsverfahren bedingte Unregelmäßigkeiten vermindert oder ganz abgestellt [WIED79, S. 16], [SCHA94, S. 10]. Oberflächendesignstrukturen tragen dazu bei, einem Kunststoffbauteil oftmals



ein besseres Aussehen zu verleihen und lassen es wertvoller erscheinen. Je nach Anwendungsbereich werden Ledernarbungen, Holzimitationen oder neutrale, putzfreundliche Strukturen gewählt [WIED90]. „Bei Lederstrukturen ist mittlerweile (...) eine Qualität möglich, die sich Echtlederoberflächen immer weiter annähert“ [KRÜT05, S. 41].

Strukturen werden darüber hinaus auch als Kaschiernarbung unter einer Folie genutzt. Dort schaffen sie Kanäle, durch die Luft entweichen kann. Wird eine Struktur als Antiblendnarbung eingesetzt, werden Lichtreflexionen gemindert. Die Oberfläche erscheint gefälliger und blendet nicht im grellen Licht. Strukturen können als Haftnarbung eine vergrößerte Oberfläche zur Haftung eines Klebers erzeugen und als Antiknarznarbung den Stick-Slip-Effekt, durch die unerwünschten Knarzgeräusche entstehen, vermindern [KRÜT05, S. 40]. Zudem sind strukturierte Oberflächen weniger empfindlich gegen Fingerabdrücke, Kratzer (Kratzempfindlichkeit) und sonstige Markierungen.

Darüber hinaus gelten strukturierte Bereiche bzw. Elemente als beständiger im Vergleich zu glatten und polierten. „They can meet functional needs: sonic weld and glue bonding surfaces, increased material flow, molding gas evacuation, and added friction to core tooling to aid in part ejection“ (siehe Internetauftritt Mold-Tech unter URL: <http://www.mold-tech.com/texturing/1tex.shtml> [16.02.2006]).

7.2.13 Gestaltung von Oberflächendesignstrukturen

Bei der Ermittlung von bereits vorhandenen Oberflächendesignstrukturen und der Gestaltung von neuen Oberflächendesignstrukturen ist die fotografische Dokumentation von realen Strukturbildern aus unterschiedlichen Bereichen sehr wichtig. So geben beispielsweise Fotografien aus der Tier- und Pflanzenwelt Auskunft darüber, wie Strukturen aufgebaut sind. Die Makroaufnahmen dieser natürlichen Strukturen werden in Graustufen umgewandelt, um eine abstrakte Sichtweise auf diese Strukturen zu ermöglichen (siehe Kapitel 6.3). Als Beispiel für eine künstlich entwickelte Struktur, die ihre Ursprünge in der Natur hat, gilt die in vielen Bereichen verwendete Ledernarbung.

Charakterisierung des Narbenbildes

Das Narbenbild – in der unten aufgeführten Abbildung das Narbenbild von Echtleder, wird charakterisiert durch die durch die Papillen bedingten Falten und Linien der Narbenmembran, dem Narbengewebe und durch die Anordnung der Haarlöcher. Der Großteil der Haut ist von der Felderhaut bedeckt. Hier zeigt die Oberfläche durch feine Furchen abgegrenzte rhombische Felder. Die Furchen entstehen an den papillenfrenen Epidermisbereichen und verstreichen bei stärkerer Hautspannung. Sie dienen als Reservefalten, da die Oberhaut weniger dehnungsfähig ist als die Lederhaut. Die Größe der Hautfelder variiert je nach Körperregion. Die Felderhaut enthält sämtliche Hautanhangsgebilde (Abb. 17).



Abb. 17: Echtleder, Fotografie (Quelle: IED 2006)

Arbeitsschritte

Der erste Schritt sollte die Frage beinhalten, ob man der Narbung eines Tierleders nahe kommen oder ein Leder frei generieren möchte. Steht die Annäherung an die Narbung eines Tierleders im Vordergrund ist eine Musteranalyse unabdingbar. Generell verfügen die meisten Narben über tiefe Furchen zwischen den Feldern und flachen Furchen, die die Felder durchziehen. Die Felder weisen kissenartige Wölbungen auf. Die Feldergröße kann grob in drei Gruppen aufgeteilt werden: Große Felder, kleine zwischengelagerte Felder und sehr kleine Felder, die dicht an die tiefen Furchen anschließen. Durch diese Anordnung von Furchen und Feldern kommt es zu Ecken und leichten Rundungen innerhalb der Narbung. Ergänzt wird diese Struktur von feinen, punktförmigen Vertiefungen, den Poren. Die Struktur lässt sich sehr gut in der folgenden Abbildung erkennen. Das Beispiel zeigt eine REM Vergrößerung einer Echtledernarbung mit Poren (Abb. 18).

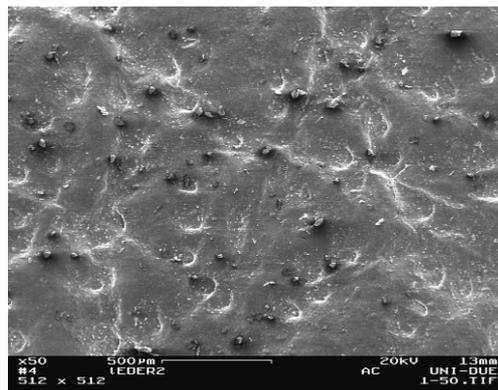


Abb. 18: Echtledernarbung mit Poren, REM Vergrößerung 1:50 (Quelle: IED)

Soll eine Echtledernarbung nachgeahmt werden, so ist es sinnvoll, die natürliche Vorlage einzuscannen und grafisch so nachzubearbeiten, dass das charakteristische Narbengewebemuster klar erkennbar ist. Empfehlenswert sind hier die gängigen professionellen Bildbearbeitungsprogramme.

Ein Faltenmuster lässt sich entweder eigenhändig erstellen oder aus einer Vorlage extrahieren. Dafür reicht es, das Linienmuster der tiefen Falten nachzuziehen und

daraus eine Ebene zu generieren (Im Folgenden wird die Ebene als Objekt bezeichnet). Abhängig von der Fläche des gewünschten Musters kann man das erstellte Objekt kacheln oder ergänzen. Das erstellte Objekt dient bereits als Mustervorlage für die tiefen Furchen. Die folgenden Abbildungen zeigen ein Beispiel für eine Erstellung einer Struktur im CAD (Abb. 19).

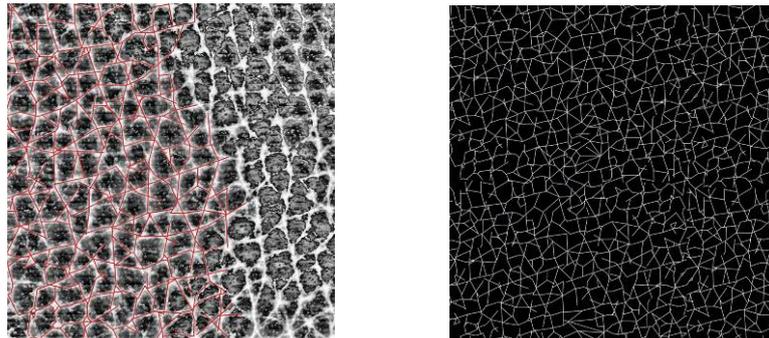


Abb. 19: Beispiel einer Strukturerstellung im CAD (Quelle: IED)

Der nächste Schritt betrifft das Hinzufügen der Felder und kleinen Fältchen, die Rundungen ins Muster bringen. Hierbei ist die Linienstärke geringer und dunkler zu wählen, als dies für das Muster der tiefen Furchen notwendig war.

In einem nächsten Arbeitsschritt sind die Muster der Felder und tiefen Furchen zu einem Objekt zusammenzufassen. Anschließend wird der Effekt *Gaußsche Unschärfe* angewendet und das Objekt wird eingefügt. Mit diesem Schritt lassen sich weiche Übergänge erzeugen, die später bei der Übersetzung ins Dreidimensionale die kissenförmige Wölbung der Felder charakterisieren.

Mit beispielsweise der Effekteinstellung *Relief* kann den tiefen Furchen ein realistisches Aussehen mit Höhenunterschieden und betonten Haareinbuchtungen verliehen werden.

Nach der Erstellung der tiefen Furchen und der Felder können nun die flachen Furchen gezeichnet werden. Entscheidend hierbei ist, dass dünne Linien ohne Kurven in einem unregelmäßigen Muster zur Anwendung kommen. Der letzte Schritt betrifft die Einbringung der Poren. Wie bei den flachen Furchen ist hier darauf zu achten, dass die Punkte in der Helligkeit sehr schwach ausfallen. Die Abbildungen zeigen drei Schritte der Erstellung einer künstlichen Oberflächendesignstruktur am Rechner (Abb. 20).

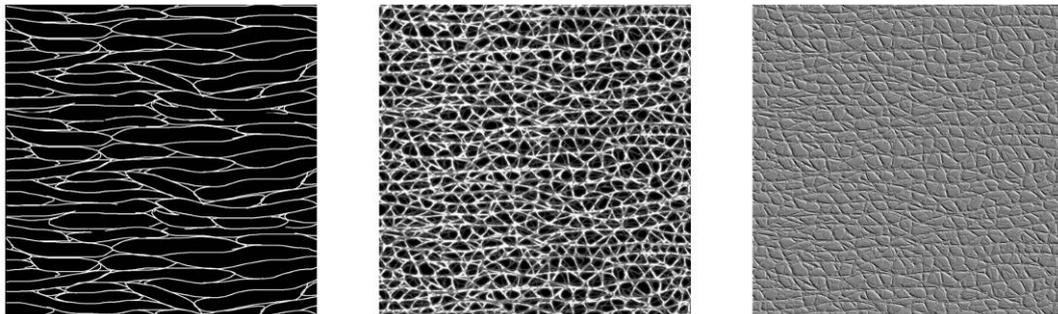


Abb. 20: Beispiel einer Strukturerstellung im CAD (Quelle: IED)

Die hier aufgezeigte Beschreibung ist lediglich beispielhaft für die Erstellung von künstlichen Oberflächendesignstrukturen zu verstehen. Das tatsächliche Strukturdesign unterliegt stets der Geheimhaltung innerhalb der einzelnen Unternehmen und wird der Öffentlichkeit nicht zugänglich gemacht.

Hervorzuheben ist die Anschlussfähigkeit der Strukturzeugung im CAD an die im Forschungsprojekt entwickelte Prozesskette und die Vielseitigkeit, die mit solchen Verfahren verbunden sind.

7.2.14 Umfrage zum Thema Oberflächendesignstrukturen in produzierenden Unternehmen

Das IED hat eine von 2004 - 2005 branchenübergreifende Befragung von Unternehmen durchgeführt. Dazu wurde ein Fragebogen entwickelt und im Hinblick auf eine quantitative Datenerhebung per E-Mail bzw. Fax an einzelne Unternehmen verschickt. Die Befragung gestaltete sich als problematisch, da das Feld der Oberflächenstrukturierung sowohl aus technischer als auch gestalterischer Sicht einem starken Auskunftsvorbehalt unterliegt.

Die Bedeutung von Oberflächendesignstrukturen steigt und die Entwicklung neuer Strukturen ist teilweise sehr zeit- und kostenintensiv. Oberflächendesignstrukturen werden immer mehr zu einem bestimmenden Faktor bei der Gesamterscheinung eines Produkts hinsichtlich Wertigkeit, Gebrauchstauglichkeit und mechanischer Eigenschaften. Sehr wenig wird daher über das Thema der Oberflächenstrukturierung preisgegeben.

Aus diesem Grund wurde die Art der Befragung optimiert und ein Online-Fragebogen erstellt. Der Link zu diesem Online-Fragebogen und ein persönliches Anschreiben wurden mit der Bitte, den Fragebogen auszufüllen, an bekannte und befreundete Unternehmen versendet.

Zielgruppe und Zielsetzung

Die Befragung wurde an Experten in produzierenden Unternehmen gerichtet. Einerseits wurde damit das Ziel verfolgt, Wünsche und Erwartungen an neue Ober-



flächendesignstrukturen zu gewinnen, zu analysieren und zu interpretieren. Andererseits sollte die Ermittlung der Kundenbedürfnisse dazu dienen, neue und nutzerorientierte Oberflächendesignstrukturen zu entwickeln.

Rücklauf

Bis Ende des Jahres 2006 wurden 56 Unternehmen, die ein strukturelevantes Produktportfolio besitzen, angeschrieben. Das Ausfüllen des Fragebogens und die anschließende Weiterleitung der Antworten an das IED erfolgten anonym, sodass keine Rückschlüsse auf die jeweiligen Teilnehmer geschlossen werden konnten. Dieses Vorgehen war eine wichtige Grundlage, Unternehmen dazu zu animieren, an der Befragung teilzunehmen.

Die Befragung hatte einen Rücklauf von 31 Fragebögen. Das entspricht einer Rücklaufquote von 57%. Der geringe Rücklauf ist auf den eher diskreten Umgang mit designrelevanten Themenstellungen zurückzuführen.

7.2.15 Aufbau des Fragebogens und Durchführung der Befragung

Der Fragebogen ist in drei Bereiche unterteilt. Der erste Teil umfasst allgemeine Angaben zu Oberflächendesignstrukturen wie z. B. Fragen zur Bedeutung von Oberflächendesignstrukturen im Unternehmen. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Strukturentwicklung und der dritte Teil beinhaltet Fragen zur Trendanalyse bzw. Fragen zu möglichen Strukturen der Zukunft. Im Folgenden sind die Fragen der drei Bereiche aufgeführt.

1. Teil Allgemeines

A1 - Warum sind Produktoberflächen Ihrer Meinung nach strukturiert (Gewichtung)? (haptische Gründe, optische Gründe, technische Gründe, Sonstiges)

A2 - Welchen Stellenwert hat die Oberflächenstruktur in Bezug auf die Gesamt-
erscheinung des Produkts? (Haptisch - sehr hoch, hoch, mittel, sehr niedrig, kei-
nen / Optisch - sehr hoch, hoch, mittel, sehr niedrig, keinen / Technisch - sehr
hoch, hoch, mittel, sehr niedrig, keinen)

A3 - Wie wichtig erscheinen Ihnen Oberflächenstrukturen?

A4 - Wie entscheidend ist eine strukturierte Oberfläche für den Kunden?

A5 - Welche Techniken setzen Sie zur Strukturierung ein (z. B. Ätztechnik)?

A6 - Wie viele verschiedene Strukturen werden in Ihrer Produktpalette einge-
setzt? (<3, 3-5, 5-10, 10-15, >15)

A7 - Um welche Art von Strukturen handelt es sich?

(Lederstrukturen, Erodierstrukturen, technische Strukturen, Holzstrukturen, Tex-
tilstrukturen, Andere)



A8 - Welche Art von Strukturen werden in Ihrem Unternehmen bevorzugt eingesetzt?

A9 - Warum sind Produktoberflächen Ihrer Meinung nach strukturiert (Gewichtung)?

2. Teil Strukturentwicklung

B1 - Wonach orientieren Sie sich bei der Entwicklung neuer Strukturen? Worauf achten Sie?

B2 - Wie werden neue Strukturen entwickelt? Bitte nennen Sie die einzelnen Vorgehensschritte.

B3 - Nutzen Sie bestimmte Software zur Entwicklung neuer Strukturen?

B4 - Welche Schwierigkeiten treten bei der Entwicklung neuer Strukturen auf?

B5 - Welche Anforderungen werden an Oberflächenstrukturen gestellt (z. B. Echtheit bei Ledernarbung, Reproduzierbarkeit etc.)?

B6a - Werden Strukturen in Ihrem Unternehmen intern getestet (z. B. Qualitätstests)?

B6b - Wenn ja, wie werden Strukturen in Bezug auf folgende Kriterien getestet? (Kratzunempfindlichkeit, Verschmutzung, Licht, Reinigungsverhalten, Druckhaptik, Sonstiges)

B8 - Werden Strukturen an Zielgruppen getestet?

3. Teil Trendanalyse

C1 - Sehen Sie Entwicklungsbedarf für neuartige Strukturen? (Bezüglich Design, Bezüglich technischer Möglichkeiten)

C2 - Existieren Ihrer Meinung nach Strukturen, deren Design „zeitlos“ ist?

C3 - Sehen Sie Entwicklungsbedarf für neuartige Strukturen? (Gestalterisch, Technisch)

C4 Welche Art von Strukturen wird Ihrer Meinung nach in Zukunft sehr gefragt sein?

7.2.16 Ergebnisse des Fragebogens

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Fragebogenaktion zusammengefasst dargestellt.

1. Teil Allgemeines



Die Befragung hat gezeigt, dass ein Großteil der Befragten, nämlich 70%, optische Gründe für die Strukturierung einer Produktoberfläche nennt. Nur 30% sind der Ansicht, dass eine Strukturierung einer Oberfläche haptische Gründe hat. Zu gleichen Anteilen wird auch der Stellenwert der Oberflächenstruktur in Bezug auf die optische und die haptische Gesamterscheinung eines Produkts gesehen. Die Fragebogenaktion hat gezeigt, dass sich Oberflächendesignstrukturen im Allgemeinen durch eine hohe visuelle Anmutung, eine geringe Verschmutzungsanfälligkeit und eine gute Reproduzierbarkeit auszeichnen sollten. Etwas weniger wichtig scheinen Kratzunempfindlichkeit und Abriebsfestigkeit zu sein. Die Kosten sind dabei von geringerer Bedeutung und stehen nicht im Vordergrund. Hier zeigt sich, dass viele Unternehmen aufgrund der Bedeutung von Oberflächendesignstrukturen bereit sind, in höhere Fertigungsmethoden bzw. Prozessketten zu investieren, wenn das Resultat diese Mehrkosten rechtfertigt.

Lederstrukturen und technische Strukturen zählen zu den bevorzugten Strukturen bei den befragten Unternehmen. Danach folgen Erodier-, Textil- und in kleinerem Maße Metallstrukturen. Im Durchschnitt werden drei bis fünf verschiedene Strukturen in der jeweiligen Produktpalette des Unternehmens eingesetzt.

2. Teil Strukturentwicklung

Die Studie hat gezeigt, dass eine hohe visuelle Anmutung und die Berücksichtigung realer Vorgaben Faktoren sind, auf die bei der Entwicklung neuer Strukturen verstärkt geachtet wird. Neue Strukturen werden oftmals anhand von Skizzen entwickelt und anschließend mithilfe von CAD- und CAM-Systemen oder Prototypen optimiert. Im Rahmen dieser Umfrage wurden auch einige Schwierigkeiten, die es bei der Entwicklung neuer Strukturen gibt, deutlich. So sind oftmals aufgrund von prozessbedingten Hindernissen mehrere Anläufe erforderlich bis die gewünschte Struktur vorliegt. Darüber hinaus bereiten nicht gekachelte Strukturen oder ungleichmäßige Strukturen Probleme. Ein weiterer Punkt ist die mangelnde Entformbarkeit.

Strukturen werden in 75% der befragten Unternehmen getestet. Nur 25% der Befragten geben an, keine Tests durchzuführen. So werden in internen Tests und nach standardisierten Verfahren Strukturen im Hinblick auf Kratzunempfindlichkeit, Verschmutzung, Licht, Reinigungsverhalten, Druckhaptik und Belastung geprüft. Rund 55% der Befragten geben an, darüber hinaus Strukturen auch an den jeweiligen Zielgruppen zu testen – so z. B. anhand von Kundeninterviews, Praxistests oder im Rahmen von Produktpräsentationen. Von den befragten Unternehmen geben 45% an, keine weiteren Tests durchzuführen.

Neue Möglichkeiten der Evaluation von Oberflächendesignstrukturen bietet der im Rahmen des Projekts entwickelte Strukturkatalog (siehe Kapitel 6.6).

3. Teil Trendanalyse

Rund 85% der Befragten sprechen sich für einen gestalterischen Entwicklungsbedarf von neuartigen Oberflächendesignstrukturen aus. Ein gutes Argument hierfür ist die gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens aufgrund inno-

vativer Oberflächenstrukturen, da Strukturen beim Kauf eines Produkts immer bedeutender werden. Die Umfrage hat darüber hinaus gezeigt, dass natürliche Strukturen wie z. B. Echtleidernarben und Erodierstrukturen zu den zeitlosen Strukturen zählen und von den Unternehmen bevorzugt eingesetzt werden (siehe oben). In Zukunft werden laut Umfrage hauptsächlich Erodierstrukturen und leicht zu reinigende Strukturen gefragt sein. Über weitere mögliche Oberflächen-designstrukturen der Zukunft wird – verständlicherweise, keine Auskunft gegeben.

7.3 Anlagenentwicklung

Ziel im Bereich der Anlagenentwicklung war es während der Projektlaufzeit auf Grundlage des erstellten Lasten- und Pflichtenhefts ein Systemkonzept zu entwickeln und umzusetzen, dass das Laserstrahlstrukturieren von Freiformflächen ermöglicht.

7.3.1 Auswahl und konstruktive Bearbeitung eines Achssystems / Konstruktive Laserintegration / Aufbau einer Demonstratoranlage

In Abb. 21 ist der Aufbau und der Anordnung der optischen Komponenten die zum Laserstrahlstrukturieren benötigt werden schematisch dargestellt. Als Scanner wurde der »hurryScan 25« in Kombination mit der motorischen Aufweitung »varioScan 40« der Fa. Scan Lab integriert, der die im Lastenheft geforderten Spezifikationen erfüllt und für den eingesetzten Nd:YVO₄ Slab-Laser des Projektpartners Edgewave hinsichtlich Wellenlänge, Leistung und Apertur (Eintrittsstrahldurchmesser) geeignet ist. Die Apertur des »varioScan 40« beträgt 10 mm. Aufgrund der Apertur des »hurryScan 25« von 25 mm darf der maximale Strahleintrittsdurchmesser in den »varioScan 40« nur 8,9 mm betragen, da der Strahl um den Faktor 2,8 im »varioScan 40« aufgeweitet wird. Bei einem Laserrohstrahldurchmesser von maximal 6 mm ergibt sich ein Strahleintrittsdurchmesser in den Scanner von 16,8 mm der damit kleiner als die maximal zulässige Apertur ist. Die genauen Spezifikationen des eingesetzten »hurryScan 25« Scanners und der motorischen Aufweitung »varioScan 40« sind in Abb. 22 dargestellt.

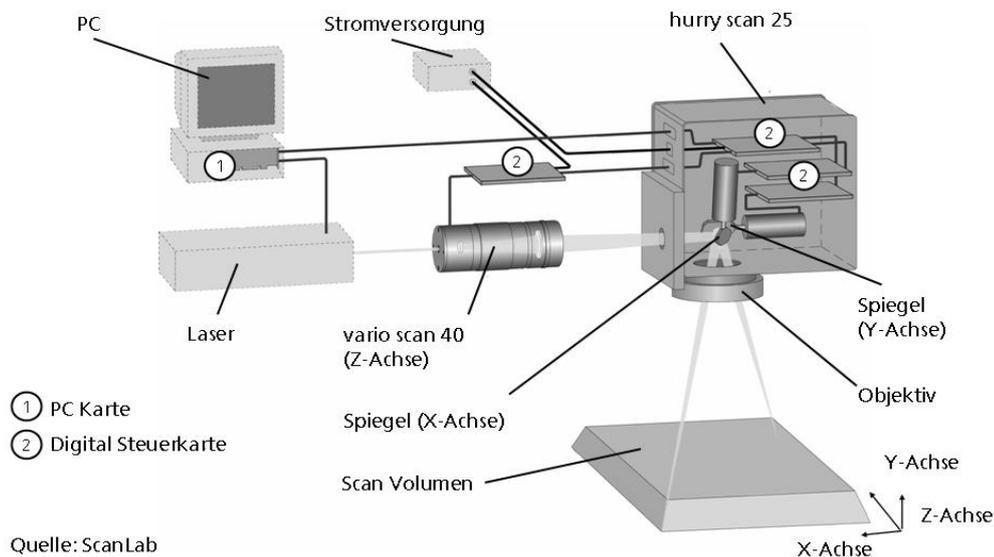


Abb. 21: Aufbau der Strahlformung über Scanner und motorische Aufweitung



Scanlab hurry scan 25

- 2-Achs-Spiegel-Galvanometer-Scanner (Wasser/Luft-Kühlung)
- Eingangsapertur: 25 mm
- Markier-Geschwindigkeit: max.: 0,8 m/s
- Positionier-Geschwindigkeit: max.: 5 m/s
- Dyn. Wiederholpräzision: < 22 μ rad
- Dyn. Verschiebung durch Temp.: < 25 μ rad/K
- Dyn. Vergrößerung des Arbeitsfelds durch Temp.: < 80 ppm/K
- Nachführfehler (Delay): 0,5 ms
- Stat. optische Vergrößerung des Arbeitsfelds: < 5 mrad
- Stat. optische Verzerrung des Arbeitsfelds: < 1,5 mrad



Scanlab vario scan 40

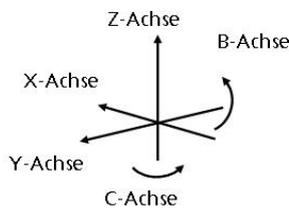
- Motorische Strahlaufweitung (z. B.: Z-Achse)
- Feste Strahlaufweitung: 2,8 fach
- Eingangsapertur: max. 8 mm
- Ausgangsapertur: max. 20 mm
- Positioniergeschwindigkeit: 18 rad/s
- Nachführfehler (Delay): 1,4 ms

Abb. 22: Spezifikationen des eingesetzten »hurryScan 25« Scanners und der motorischen Aufweitung »varioScan 40«

Um die großflächigen Freiformflächenbauteile strukturieren zu können ist das Laserstrahlstrukturiersystem in eine Fertigungszelle (siehe Abb. 23) integriert. Mit Hilfe der Fertigungszelle wird der Laserfokus auf einer 3D-Freiformfläche positioniert. Bei der Umsetzung dieses Konzepts wurde eine modulare Lösung entwickelt, in der die gesamte Laserbearbeitungseinheit auf die Z-Achse eines 5-Achs Positioniersystems adaptiert wird. Da eine Standardmaschinensteuerung eingesetzt wird (Heidenhain iTNC 530), ermöglicht dieses Konzept ggf. auch die einfache Adaption der Lasertechnologie auf andere Basisträger, sodass hierdurch Vermarktungsmöglichkeiten gesteigert werden.



Mikron HSM 600 U (Quelle: Mikron)



Verfahrwege der Achsen

- X-Achse: 800 mm (+555/-245)
- Y-Achse: 600 mm (+200/-400)
- Z-Achse: 500 mm
- C-Achse: $n \times 360^\circ$
- B-Achse: $+100^\circ/-30^\circ$

Herstellerangaben für Positionier- und Wiederholgenauigkeit der X/Y/Z-Achse im definierten Arbeitspunkt (nach ISO 230-2/97):

- Bidirektionale Positioniergenauigkeit A: 8 μm
- Mittlere, bidirektionale Positionsabweichung M: 5 μm
- Unidirektionale Positionierungswiederholgenauigkeit $R^\uparrow / R^\downarrow$: 5 μm

Steuerung

- Heidenhain iTNC 530

Abb. 23: Fertigungszelle mit Achsverfahrwegen und Positioniergenauigkeiten

In Abb. 24 sind verschiedene Anordnungen für das modulare Laserstrahlstrukturiersystem und die Bearbeitungsoptiken dargestellt, die während der Konzeptphase entwickelt wurden. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Lage des Arbeitsraums, der mit dem Tool Center Point (TCP) in Bezug zu dem Maschinentisch angefahren werden kann, wie in Tab. 1 dargestellt ist. Die Achsanordnung und -verfahrwege des Handhabungssystems sind optimal für einen TCP in der Spindelachse ausgelegt. Deshalb muss die Position des Fokus, der beim Laserstrukturieren den TCP darstellt, so gewählt werden, dass er nahe der Spindelachse liegt und so weiterhin ein möglichst optimale Lage des Arbeitsraums in Bezug zum Maschinentisch gewährleistet ist. Der Scanner muss also so eingebaut werden, dass der austretende Strahl senkrecht nach unten geht. Aufgrund der Lage des Scanners ergibt sich dann die Lage der motorischen Aufweitung die in horizontaler Lage mit einem Abstand von 20 mm zum Scannereintritt eingebaut werden muss. Um die auftretenden Massenkräfte und Schwingungsneigung zu minimieren, muss die Laserquelle möglichst nahe den Achsen eingebaut werden.

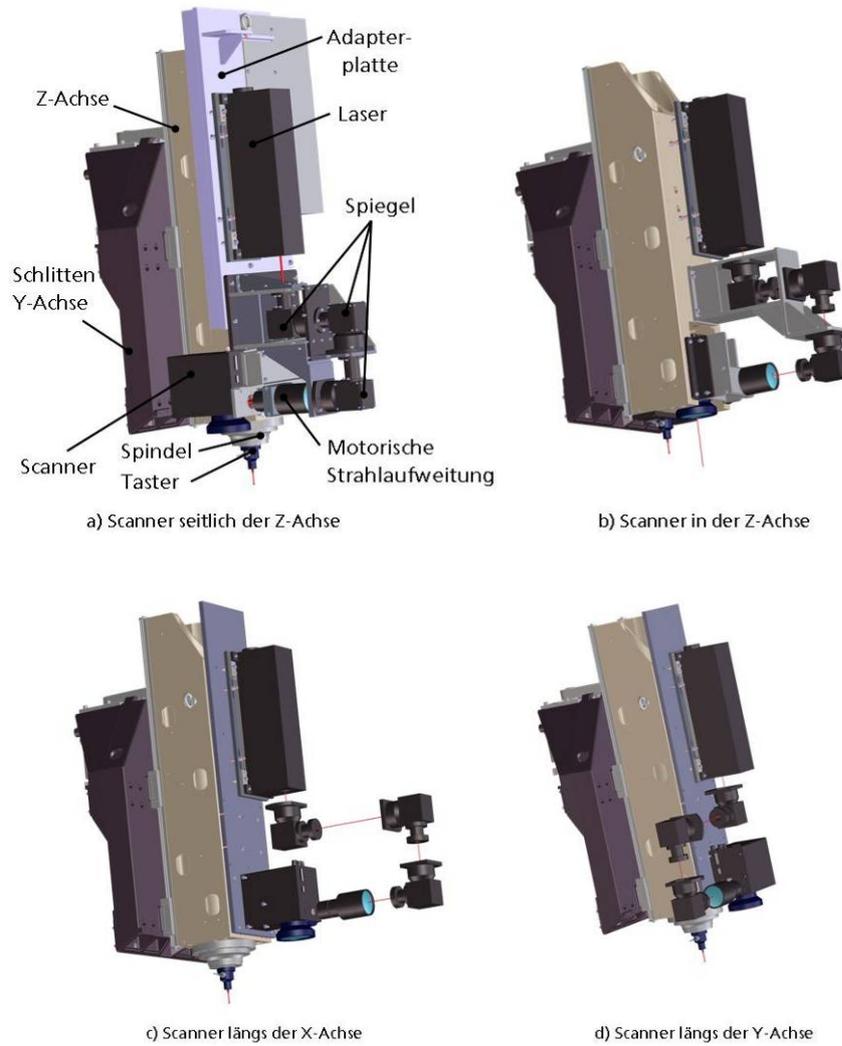
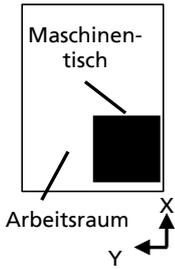
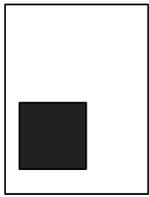
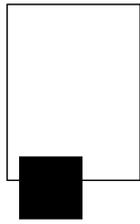
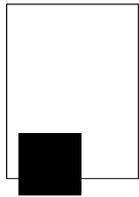


Abb. 24: Verschiedene Integrationskonzepte für das Lasersystem und die Bearbeitungsoptiken mit unterschiedlichen Anordnungen des Scanners



Konzept	A: Seitlich der Z-Achse	B: In der Z-Achse	C: Längs der X-Achse	D: Längs der Y-Achse
Arbeitsraumlage im Bezug zum Maschinentisch				
Bewertung Arbeitsraum	++	++	--	-

Tab. 1: Lage des mit dem TCP anfahrbaren Arbeitsraums relativ zu dem Maschinentisch für die vier Integrationskonzepte der Laserstrukturiereinheit

In Konzept A ist der Scanner bzw. das Festobjektiv seitlich von der Z-Achse angebracht. Dadurch liegt der TCP in X-Richtung auf derselben Höhe mit der Spindel. Aufgrund des asymmetrischen Verfahrensweges der Y-Achse in Bezug zur Mitte des Maschinentischs ist auch hier nur ein unwesentliches Verschlechterung der Lage des Arbeitsraums gegeben.

In Konzept B ist der Scanner in der Z-Achse angeordnet. Dadurch liegt der TCP in der Spindelachse. Das bedeutet, dass die Lage des Arbeitsraums optimal ist. Gegenüber dem Konzept B ist jedoch eine geringe Modularität gegeben. Des Weiteren muss die Spindel ausgebaut werden, sodass der Taster für die Werkstücklagervermessung nicht mehr in der Spindel aufgenommen werden kann.

In Konzept C ist der Scanner in Richtung der X-Achse an der Z-Achse angeordnet. Der Strahleintritt erfolgt längs der X-Achse. Hier ist eine deutliche Verschlechterung des Arbeitsraums aufgrund des großen Abstandes des TCP zur Spindelachse in Richtung der X-Achse gegeben. Mit diesem Konzept können zwar die Werkzeugformeneinsätze für schnurlose Telefone der Fa. Siemens in einer Aufspannung bearbeitet werden, nicht jedoch die größeren Werkzeugformen für Handschuhfachklappen der Fa. BMW. Aus diesem Grund wurde das Konzept verworfen.

In Konzept D ist der Scanner ebenfalls vor der Z-Achse angeordnet, jedoch mit dem Strahleintritt längs der Y-Achse. Dies bietet aufgrund der Abmessungen des

Scanners leichte Vorteile für die Lage des TCP gegenüber dem Konzept C, jedoch ist hier ebenfalls eine Bearbeitung der Bauteile der Fa. BMW in einer Aufspannung nicht möglich, weshalb auch dieses Konzept verworfen wurde.

Aus diesen Überlegungen heraus ist das Konzept A das am besten geeignete, da es sowohl bei der Lage des Arbeitsraums in Bezug zum Maschinentisch hervorragende Eigenschaften bietet als auch eine hohe Modularität besitzt. Dies erlaubt eine einfachere Integration auch in andere Handhabungssysteme, sodass die Vermarktung erleichtert wird. Aus diesen Gründen wurde das in Abb. 25 dargestellte Konzept A umgesetzt.



Abb. 25: Integration des Laserstrukturiersystems in ein 5-Achs Basisträger

Das Laserstrahlstrukturiersystem, bestehend aus der Laserstrahlquelle, Spiegeln und drei optischen Achsen, ist über eine Adapterplatte mit der vertikal liegenden Z-Achse des Basisträgers verbunden, sodass die volle 5-Achsigkeit der Maschine zur Positionierung der Werkstücke in den Arbeitsraum der optischen Achsen genutzt werden kann. Um die Sicherheit der Anlage für den Bediener zu gewährleisten, ist der Bearbeitungsraum durch Abdeckungen voll gekapselt und zur Prozessbeobachtung mit entsprechenden Laserschutzgläsern ausgestattet.

In Abb. 26 ist der detaillierte Aufbau des Laserstrahlstrukturiersystem mit der Ansteuerungseinheit dargestellt. Das System ist wie beschrieben modular über eine Adapterplatte an den Basisträger angebunden und besteht aus der senkrecht angebrachten Laserstrahlquelle, Umlenkspiegeln, einem Scanner und einer motorischen Strahlaufweitung zur Strahlführung und Strahlformung sowie einem Pilotlaser.

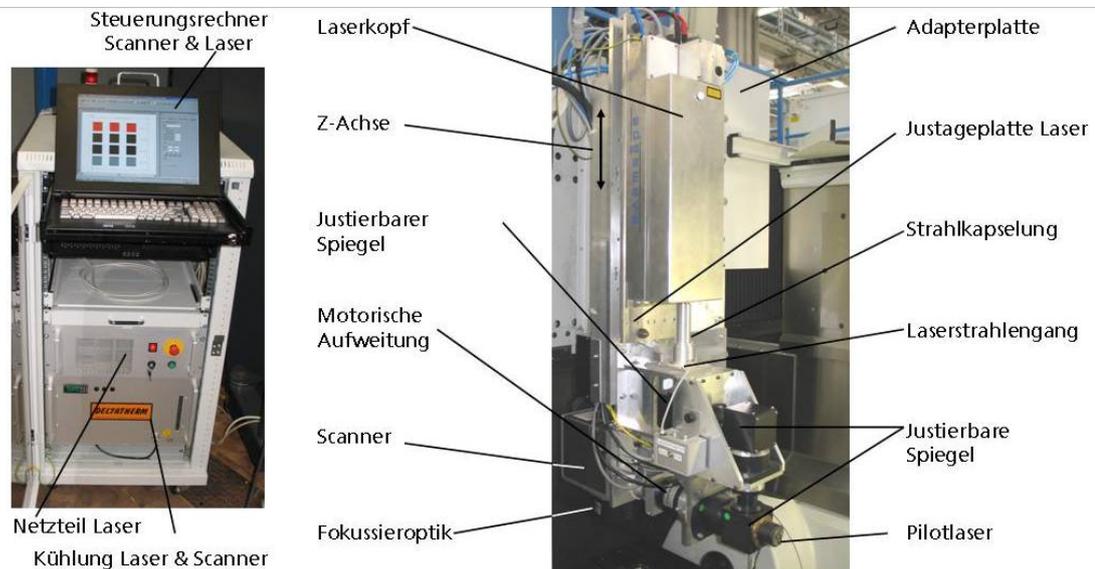


Abb. 26: Aufbau des Laserstrahlstrukturiersystems

In Abb. 27 ist der Strahlengang des Bearbeitungslasers und die Einkopplung des Pilotlaser dargestellt. Dabei wird der senkrecht austretende Bearbeitungslaserstrahl über drei Umlenkspiegel in eine motorische Strahlauweitung vom Typ »vario scan 40« der Firma Scanlab gelenkt, der eine Positionierung des Laserfokus in Strahlrichtung erlaubt. Der aufgeweitete Laserstrahl fällt dann in einen Scanner vom Typ »hurry scan 25« der Firma Scanlab, der über zwei Spiegel den Laserfokus in einer Ebene orthogonal zum Laserstrahl positionieren kann. Der ausgelenkte Laserstrahl wird über auswechselbare Optiken auf einen Durchmesser von 15 bis 50 μm fokussiert. Die Größe des Scanvolumens, also dem Volumen, in dem der Laserfokus mit den optischen Achsen positioniert werden kann, hängt von der eingesetzten Optik ab. Dabei gilt, dass je kleiner der Fokusbereich ist, desto kleiner ist auch das Volumensegment, das bearbeitet werden kann und desto kleiner ist der Arbeitsabstand. So ergibt sich beispielsweise für ein Objektiv mit einer nominellen Brennweite von 163 mm ein Scanvolumengröße von ca. $75 \times 75 \times 11 \text{ mm}^3$ bei einem Fokusbereich von 30 μm und einem Arbeitsabstand von 193 mm.

Über den letzten der halbdurchlässigen Umlenkspiegel wird zusätzlich ein Pilotlaser eingekoppelt, dessen Wellenlänge im sichtbaren Bereich liegt und dessen Leistung ungefährlich für das menschliche Auge ist. Der Pilotlaser erlaubt eine einfache Vorpositionierung des Werkstücks und eine Simulation des Prozesses.

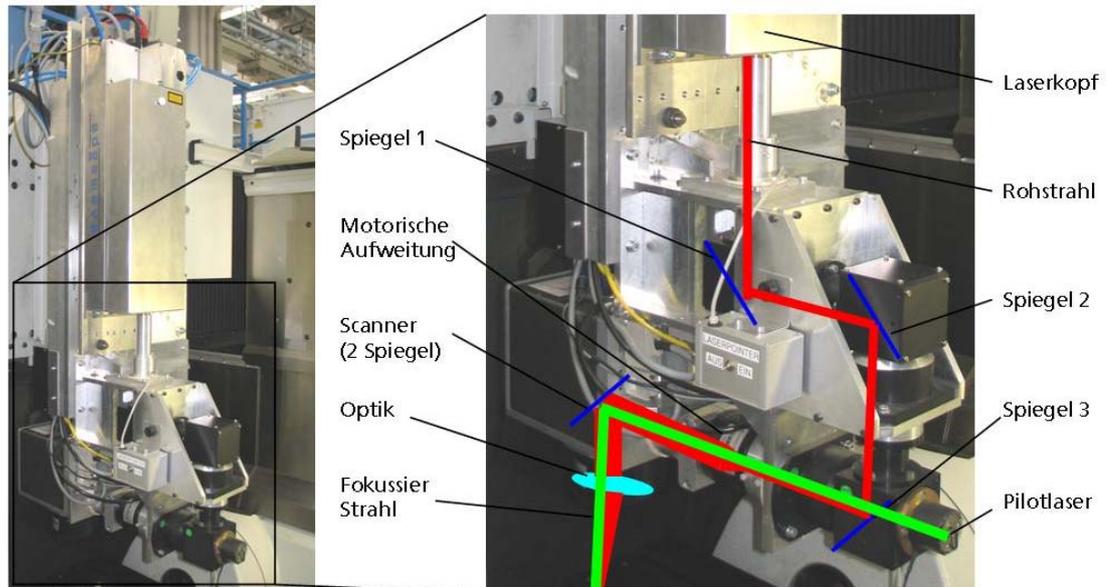
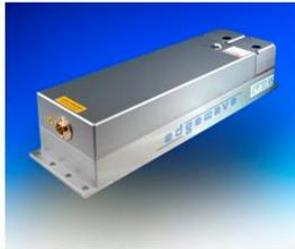


Abb. 27: Strahlengang des Abtraglasers und des Pilotlasers

Für die Justage des Koordinatensystems der drei optischen Achsen gegenüber dem des Maschinenkoordinatensystems, ist die Einheit aus Scanner und motorischer Strahlauflerung in den drei rotatorischen Freiheitsgraden einstellbar zur Adapterplatte angebracht. Um zu gewährleisten, dass der Laserstrahl deckungsgleich mit der optischen Achse der motorischen Aufweitung liegt, besitzen die Spiegel jeweils zwei einstellbare rotatorische Freiheitsgrade. Die Laserquelle kann zusätzlich in allen sechs Freiheitsgraden justiert werden. Dies ermöglicht ein sicheres Ausrichten der optischen Komponenten zueinander und zur Maschine. Die sechs Freiheitsgrade des Lasers erlauben zusätzlich ein Auswechseln und erneutes Einrichten des Lasers, ohne dass dabei die restlichen optischen Komponenten erneut zueinander justiert werden müssen. Um die optischen Komponenten vor Verschmutzung zu schützen, ist der gesamte Strahlengang gekapselt. Dieses bietet zusätzlichen einen Vorteil für die Lasersicherheit.

Die Ansteuerungseinheit des Laserstrahlstrukturiersystems besteht aus einem Steuerungsrechner, der die drei optischen Achsen des Systems und gleichzeitig das Lasernetzteil ansteuert. Das Lernetzteil gibt dann die Laserparameter wie Leistung, Pulsfrequenz und -dauer an den Laserkopf weiter.

Abb. 28 zeigt eine Prinzipskizze des neu eingesetzten Innoslab 41-E Nd:YVO₄ Lasers mit einer maximalen mittleren Leistung von 36 W, einer minimalen Pulslänge von 5 ns und einer Pulsspitzenleistung von bis zu 0,5 MW. Das laseraktive Material Neodym ist dabei in einen kachelförmigen (engl. slab) YVO₄-Kristall eindotiert und wird von einem Diodenlaser angeregt. Die kurzen Pulse werden dann über einen Q-Switch (eine optischen Schalter) ausgekoppelt.

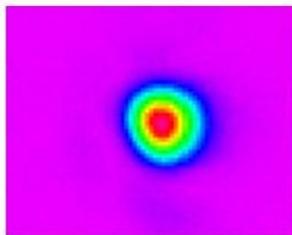


EdgeWave Laser

EdgeWave

- Lasermedium: Nd:YVO₄
- Wellenlänge: 1064 nm
- Strahlqualität: M² < 2
- Max. Leistung: 36 W *
- Pulsfrequenz: 0 – 40 kHz
- Min. Pulslänge: 5 ns

* nach Entfernung der Nebenmaxima



Intensitätsverteilung in der Fokusebene

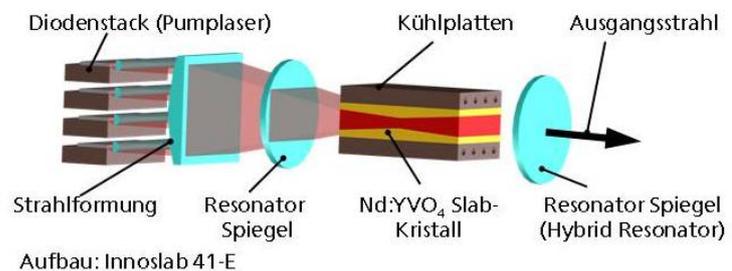


Abb. 27: Aufbau der neuen Laserstrahlquelle Innoslab 41 E von Edgewave

Für die Bearbeitung der Bauteile ist die Kenntnis der Bauteillage in Bezug zum Tool-Centre-Point (TCP) notwendig. Um eine Referenz zwischen Laserfokus, der den TCP für die Laserbearbeitung darstellt, und dem zu bearbeitendem Werkstück herzustellen, kann ein taktile Messtaster mit einer Hohlschaftkegelaufnahme (HSK-Aufnahme) in der Spindel aufgenommen werden und über Antast-routinen, die in der Maschinensteuerung bereits vorgesehen sind, die Lage des Werkstücks relativ zum TCP bestimmen. Das Tastsignal des Sensors wird mittels Infrarotstrahlung an die Maschinensteuerung übertragen, sodass beim Einwech-seln des Sensorkopfs keine weitere Verkabelung erfolgen muss. Über eine Ver-rechnung des Offset zwischen der Messtasterspitze und dem TCP der Laserbear-beitung kann in der CAx-Kette die Lage des Werkstücks berücksichtigt und die Bearbeitungsprogramme können entsprechend angepasst werden.

7.3.2 Steuerungsimplementierung / Betrachtung der Mensch-Maschine-Schnittstelle

In Abb. 28 ist die steuerungstechnische und elektrische Verknüpfung der Ferti-gungszelle zum Laserstrahlstrukturieren dargestellt. Die Maschinensteuerung ist in diesem System der Master. Über Befehle im NC-Programm werden Funktions-bausteine auf der »PLC« der Maschine aufgerufen und Datenbausteine beschrie-ben, sodass über eine für das Projekt entwickelte Schnittstelle Programme auf dem »Steuerungsrechner Scanner & Laser«, dem Slave, aufgerufen werden kön-nen. Das NC-Programm wird durch die vom Fraunhofer IPT und Delcam entwi-ckelte CAD/CAM Kopplung generiert. Um eine einfache Anpassung des Prozesses zu gewährleisten, können Parameter wie etwa die Laserleistung zentral im NC-Programm variiert werden. Der »Steuerungsrechner Scanner & Laser« steuert dann entsprechend dem Programmaufruf von der »Maschinensteuerung« den

»Scanner«, die »Motorische Strahlaufweitung« und das Netzteil des Lasers an. Um einen sicheren Betrieb der Anlage zu gewährleisten, sind entsprechende Not-Aus und Interlock Verbindungen hardwaremäßig verdrahtet. So ist die gesamte Anlage an den Sicherheitskreis des Laserbereichs des Fraunhofer IPT angeschlossen. Das bedeutet u. a., die Sicherstellung, dass der Laser nur mit einer zentralen Freigabe (»Externe Laserfreigabe«) angestellt werden kann und dass die Anlage in den Not-Auskreis (»Externer Not-Aus«) des Laserbereichs integriert ist. Des Weiteren sind die Not-Auskreise der Maschine und des Lasers miteinander verbunden. Über eine Interlockverbindung des »Lasernetzteils« mit der Maschinentür ist sichergestellt, dass der Laser nur bei geschlossener Maschinentür aktiviert werden kann.

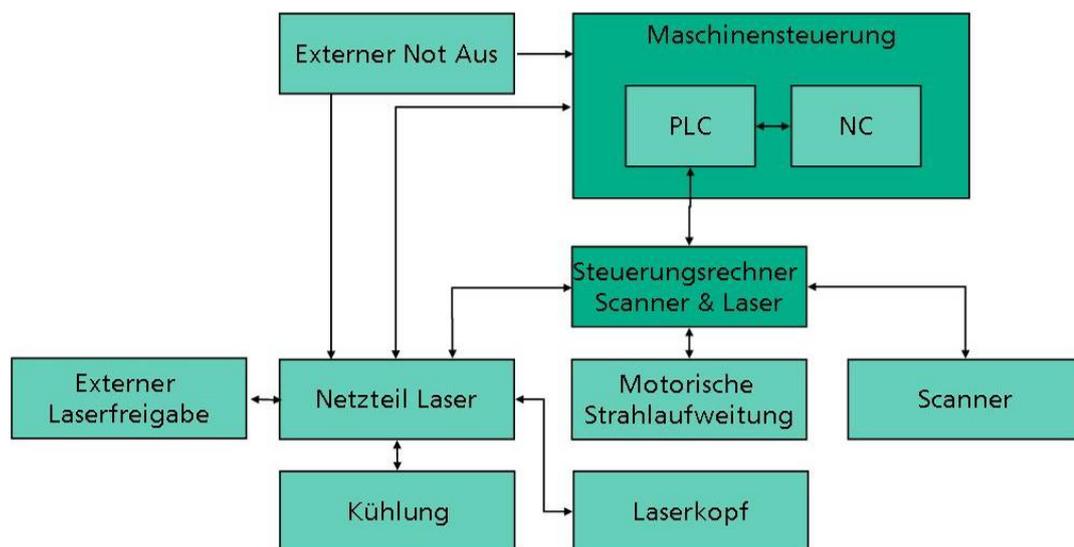


Abb. 28: Model der elektrischen und steuerungstechnischen Verknüpfung der Hardware

7.3.3 Messtechnische Untersuchungen / Optimierung des Gesamtsystems / Maschinenseitige Anpassung an optische und messtechnische Komponenten

Das großflächige Laserstrukturieren von Bauteilen stellt sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der mechanischen Achsen, da ansonsten ein Versatz zwischen dem Ist- und Sollnullpunkt des Koordinatensystems der optischen Achsen die Folge ist, der sich direkt in der Qualität des Bearbeitungsergebnis niederschlägt. Ein wichtiger Arbeitspunkt innerhalb des Projekts ist es deshalb, die Genauigkeit der Fertigungszelle messtechnisch zu charakterisieren und den Basis-träger auf den Einsatz zum Laserstrukturieren zu optimieren.

Die Bestimmung der Genauigkeit von Maschinen erfolgt üblicherweise nach der ISO 230-2 (Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axis). In Abb. 29 ist die Messroutine zur Bestimmung der Positionierge-

naugigkeit dargestellt. Dabei werden mehrfach Punkte auf der Achse aus beiden Anfahrrichtungen angefahren, die Abweichung zur Sollposition gemessen und die Kennwerte wie Positioniergenauigkeit, Wiederholgenauigkeit und Umkehrspiel nach der in Abb. 30 gezeigten Vorgehensweise bestimmt.

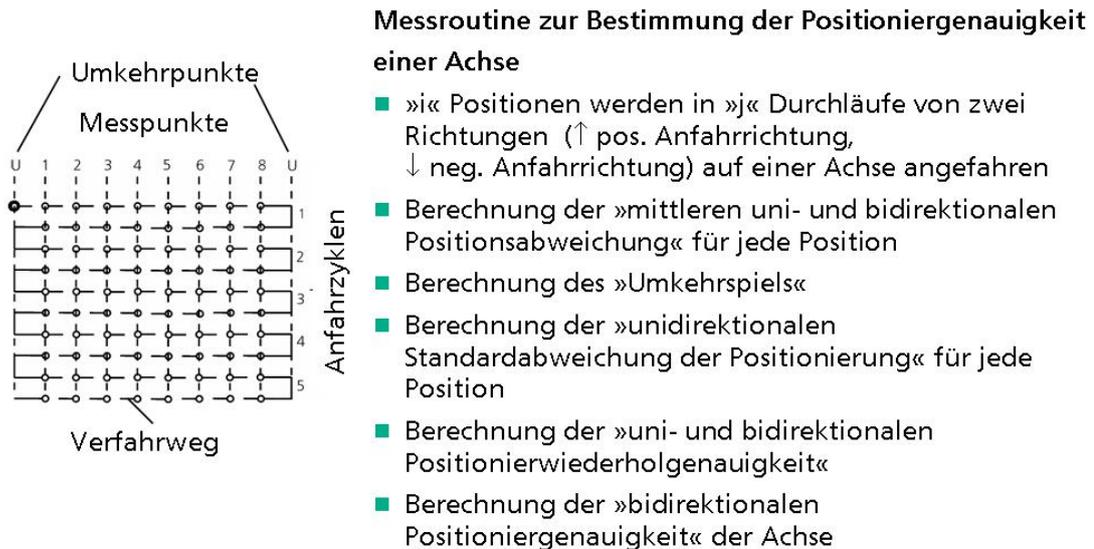


Abb. 29: Messroutine zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit einer Achse

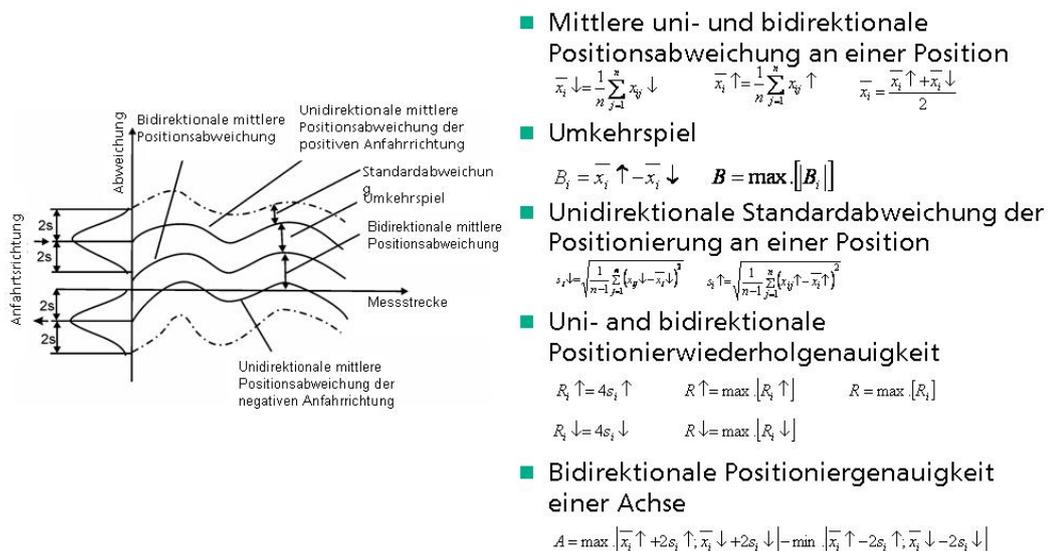


Abb. 30: Analyse von Positioniergenauigkeitsmessungen nach ISO 230-2

Abb. 23 zeigt den Aufbau des Basisträgers und die Herstellerangaben zur Positioniergenauigkeit der mechanischen Achsen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Angaben nur für einen fest definierten Arbeitspunkt der Maschine unter festgelegten Umgebungsbedingungen gelten. Weichen der Arbeitspunkt oder die Umgebungstemperatur von den Bedingungen ab, verschlechtert sich die Genau-

igkeit der Maschine. Eine Hauptursache hierfür ist die in die Linearmaßstäbe eingebrachte Wärme etwa durch Verlustleistungen der Motoren, Reibung in den Führungen und den Kugelrollspindeln oder eine erhöhte Umgebungstemperatur. Dadurch wird ein zum Teil nicht lineares Temperaturfeld in den Linearmaßstäben erzeugt, die aufgrund des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von 8 Mikrometer pro Grad Temperaturänderung und Meter Maßstab die Länge ändern. Da die Maßstäbe der Maschinensteuerung als Grundlage für die Positionierung dienen, führen Längenänderung der Maßstäbe zu einem entsprechenden Positionierfehler.

Abb. 31 zeigt die Positioniergenauigkeit der X-Achse der Maschine im vom Hersteller festgelegten Arbeitspunkt (1 h lang werden alle Achsen mit 5 m/min bewegt und die Spindel bei 15.000 U/min betrieben). Abb. 32 zeigt die Positioniergenauigkeit der X-Achse der Maschine im kalten Zustand bzw. Zustand während des 3D-Segment-Prozesses. Die Positioniergenauigkeit der X-Achse nimmt dabei von 8,2 μm im Arbeitspunkt auf 16,1 μm im kalten Zustand ab. Das stellt in etwa eine Verschlechterung um den Faktor zwei dar. Da beim Laserstrahlstrukturieren der Arbeitspunkt näher am kalten Zustand der Maschine liegt, kann durch eine Abstimmung auf diesen Arbeitspunkt die Qualität des gesamten Prozesses gesteigert werden. Die Wiederholgenauigkeit ist mit 6,1 μm weitgehend unabhängig von dem Arbeitspunkt. In Abb. 33 sind die Positioniergenauigkeiten für verschiedene Kompensationen für den Arbeitspunkt beim Laserstrahlstrukturieren miteinander verglichen. Mit der angepasste Kompensation kann eine Verbesserung um den Faktor 2 im Vergleich zur original Kompensation erzielt werden. In Abb. 34 sind die mit den optimierten Kompensationen erreichbaren Positioniergenauigkeiten für die Linearachsen aufgelistet.

- Hallentemperatur: 22 °C
- Warmlaufzyklus von zwei Stunden mit allen Achsen
- Linearmaßstab der Achse hat sich erwärmt und ausgedehnt ($a = 8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}/\text{m}$)
- Achse fährt „zu weit“
- Bidirektionale Positioniergenauigkeit: 8,2 μm
- Unidirektionale Positionierwiederholgenauigkeit: 6,1 μm

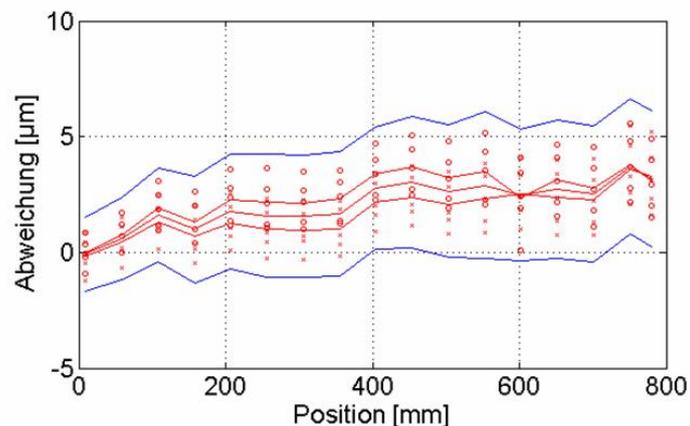


Abb. 31: Positioniergenauigkeit des Basisträgers im warmgelaufenem Zustand (X-Achse)



- Hallentemperatur: 22 °C
- Maschine im Kaltzustand
- Linearmaßstab der Achse hat Hallentemperatur
- Achse fährt „zu kurz“
- Bidirektionale Positioniergenauigkeit: 16,1 µm (wesentlich schlechter als im Arbeitspunkt)
- Unidirektionale Positionierwiederholgenauigkeit: 6,1 µm (wie im warmen Maschinen zustand)

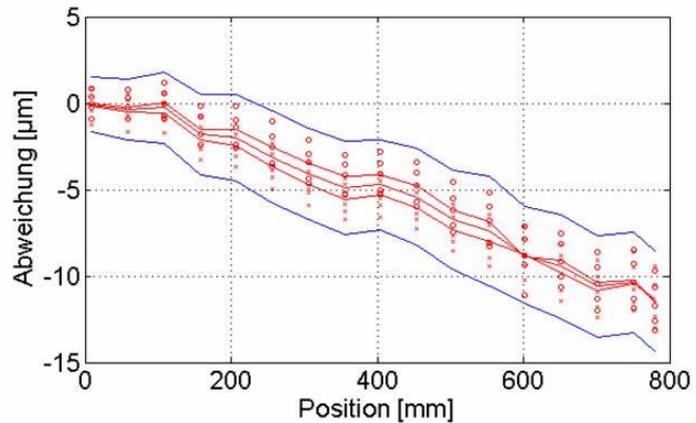


Abb. 32: Positioniergenauigkeit des Basisträgers im kalten Zustand (X-Achse)

- Hallentemperatur: 22° C
- Maschine für zwei Stunden angeschaltet (Kühlung läuft, Achsen bewegen sich nicht)
- Temperaturexpansionskoeffizient des Linearmaßstabs ($\alpha = 8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}/\text{m}$)
- Bezogen auf die Positionierung zwischen zwei Scanfeldern (Abstand 20 mm) ergibt sich mit der angepassten Kompensation eine Abweichung von 0,2 µm also unterhalb der Wiederholgenauigkeit

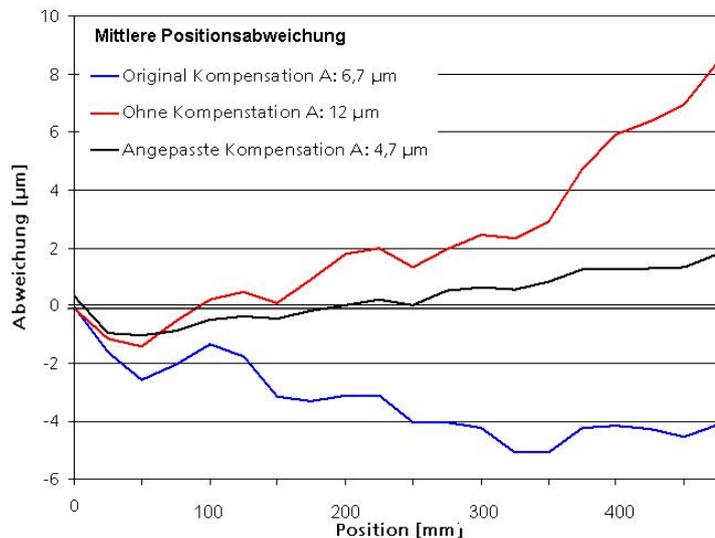


Abb. 33: Vergleich der Positionierabweichung für verschiedene Kompensationen im Arbeitspunkt des Laserstrahlstrukturierens (3D-Segment-Prozess)

	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
Verfahrweg [mm]	530	180	170
Bidirektionale Positioniergenauigkeit A [μm] mit originaler Kompensation	6,7	6,1	2,4
Bidirektionale Positioniergenauigkeit A [μm] mit angepasster Kompensation	4,7	2,0	1,3
Maximaler Verfahrweg für das Laserstrahlstrukturieren [mm]	150	150	150
Bidirektionale Positioniergenauigkeit A [μm] mit originaler Kompensation	1,9	5,1	2,1
Bidirektionale Positioniergenauigkeit A [μm] mit angepasster Kompensation	1,3	1,7	1,1

Abb. 34: Vergleich der Positioniergenauigkeit mit original und optimierte Kompensation im 3D-Segment-Prozess

7.4 CAD/CAM-Technik

Üblicherweise werden großflächige Strukturen unabhängig vom späteren Bauteil entwickelt und in einem Strukturkatalog abgelegt. So können diese Strukturen als Grundlage zur Oberflächengestaltung von verschiedenen Bauteilen dienen. Dabei kann die Struktur direkt als 3D-Datensatz vorliegen, sie kann aber auch als (2D-) Bild kodiert sein, wobei die Höheninformationen der Struktur durch Grauwerte abgebildet sind. Die Form der Darstellung ist abhängig von der Vorgehensweise bei der Entwicklung der Struktur. Hier stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die je nach Art der Struktur Vorteile bieten. Bei technischen Strukturen mit sich häufig wiederholenden, identischen Elementen hat sich die dreidimensionale Modellierung in einem CAD-Programm bewährt. Bei unregelmäßigen natürlichen Strukturen kann die direkte Bearbeitung von 2D-Bildern (Höhenkarten) Vorteile bringen. Grundlage hierfür kann z.B. ein gewöhnlicher Scan sein, der in einem Bildbearbeitungsprogramm weiterentwickelt wird. Für technische Bauteile, bei denen die Oberflächenstruktur spezielle funktionelle Anforderungen erfüllen muss, wird die Struktur üblicherweise direkt für das Bauteil entwickelt. Die fertige Struktur wird dann mit einem CAD-Programm auf das zu strukturierende Bauteil aufgebracht und als 3D-Datensatz an das CAM-Modul weitergegeben.

7.4.1 Strukturabbildung mittels Displacement-Mapping

Das Verfahren des Displacement-Mappings ist in der Computergrafik gebräuchlich, um geometrisch einfachen Oberflächen eine komplexe Struktur zu verleihen. Einer Modellgeometrie werden hierzu Informationen über die Beschaffenheit seiner Oberfläche zugewiesen. Diese Reliefinformationen werden separat von der Modellgeometrie behandelt.

Die Struktur liegt hier als „Höhenkarte“ vor. Diese besteht aus einem Bild, in dem die Höheninformationen durch Farbinformationen (üblicherweise durch Grauwerte) hinterlegt sind. Die Ursprungsgeometrie wird entsprechend der Auflösung dieser sog. Displacement-Map in mehrere kleine Flächen unterteilt (Abb. 35, b). Die neuen Punkte werden nun entsprechend der Höheninformation in Richtung der Flächennormalen verschoben (Abb. 35, c).

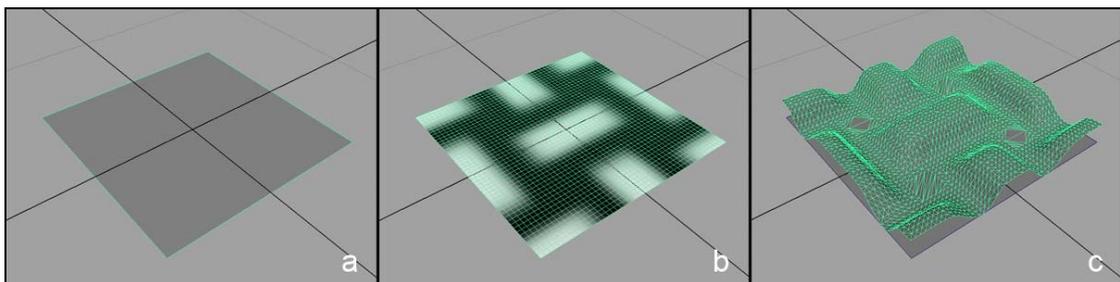


Abb. 35: Arbeitsschritte beim Displacement-Mapping

Um eine komplexe, kleinteilige Struktur möglichst genau abzubilden, ist eine entsprechend hohe Auflösung der Höhenkarte notwendig. Legt man die Größe eines Laserbrennpunktes von $10\ \mu\text{m}$ als kleinstmöglichen Teilbereich der Struktur zugrunde, sind zur Beschreibung einer $1\ \text{mm}^2$ großen Fläche 100×100 Pixel erforderlich. Dies entspricht einer Auflösung von $1000\ \text{px/cm}$ oder $2540\ \text{dpi}$. Eine Auflösung von $500\ \text{px/cm}$ ($1270\ \text{dpi}$) hat sich jedoch als ausreichend erwiesen. Ein Struktursegment von $1 \times 1\ \text{cm}^2$ wird hierbei durch ca. 500.000 Einzelflächen dreidimensional beschrieben. Zur Speicherung der strukturierten Geometrie im binären STL-Format ("Standard-Triangulation-Language") fallen hierbei Datenmengen von ca. $25\ \text{MB/cm}^2$ an.

Da bei der Anwendung des Displacement-Algorithmus´ Kontrollpunkte in einem definierten Rasterabstand erzeugt werden, werden unter Umständen zunächst mehr Informationen erzeugt, als tatsächlich notwendig wären. Weist die Strukturgeometrie einen größeren Bereich gleicher Höhe auf, könnte dieser durch eine einzelne Fläche beschrieben werden. Durch die Rasterung wird dieser Bereich jedoch in Einzelflächen mit der zuvor definierten Kantenlänge unterteilt.

Verschiedene Softwareapplikationen stellen hier jedoch Optimierungsalgorithmen bereit, um diese Einzelflächen zusammenzufassen und die anfallende Datenmenge zu reduzieren.

Bei der Darstellung von Strukturen mittels Displacement-Mapping müssen bestimmte Einschränkungen beachtet werden. Da jedem Punkt der Grundfläche nur genau ein Höhenwert zugeordnet ist, können nur Höhenwinkel kleiner als 90° dargestellt werden. So ist es nicht möglich Überschneidungen darzustellen (Abb. 36 links) oder genau rechte Winkel abzubilden (Abb. 36 rechts).

Bei einer Bildpunktgröße von 20 µm und einer Strukturhöhe von 100 µm ergibt sich ein maximaler darstellbarer Winkel α von ca. 79°.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{100 \mu\text{m}}{20 \mu\text{m}} = \tan^{-1} 5 = 78,69^\circ$$

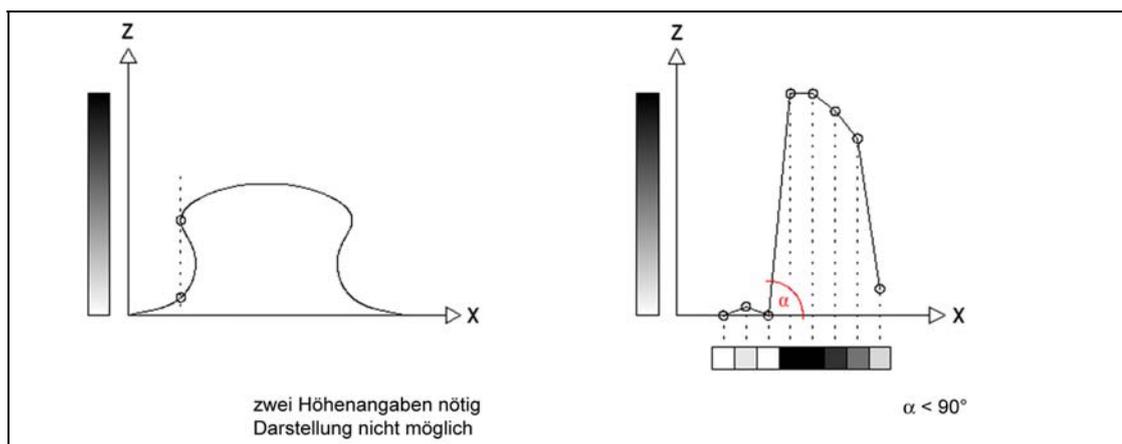


Abb. 36: Einschränkungen durch Displacement-Mapping

Diese Einschränkungen haben sich in der Praxis jedoch als unkritisch erwiesen, da durch andere Anforderungen an das Strukturdesign (wie z.B. an die Entformbarkeit des Bauteils) entsprechend steile Winkel vermieden werden müssen.

Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Höhenabstufungen ergibt sich aus der verwendeten Farbtiefe der Höhenkarte. Bei einer 8-Bit-Graustufenarstellung stehen 256 Höhenwerte zur Verfügung. Bei einer Strukturtiefe von 100 μm und Laserabtragtiefe pro Schicht von 2.5 μm ist dies üblicherweise ausreichend. Ist eine feinere Abstufung erforderlich, können Graustufenbilder mit 16 Bit Farbtiefe (65536 Werte) oder RGB-Bitmaps mit bis zu 48 Bit Farbtiefe ($>2.8 \times 10^{14}$ Werte) verwendet werden.

Da die Höhenangaben nur relativ sind, ist gesondert anzugeben, welche maximale (absolute) Höhe die Struktur hat.

7.4.2 Dreidimensionale Strukturentwicklung im CAD

Eine Möglichkeit der Strukturerstellung besteht in der direkten dreidimensionalen Modellierung der Struktur mit einem CAD-System. Diese Methode findet insbesondere Verwendung bei der Entwicklung von funktionalen Oberflächen (z.B. tribologischen Strukturen), die genau definierte Formen und Eigenschaften aufweisen müssen. Vorteile bietet diese Vorgehensweise auch bei regelmäßigen Strukturen mit sich häufig wiederholenden identischen Elementen.

Üblicherweise werden diese Strukturen auf einer ebenen Grundfläche entwickelt, um später per Displacement-Mapping auf beliebig geformte Bauteiloberflächen aufgebracht zu werden. Hierzu muss die per CAD erstellte 3D-Struktur (Abb. 37 a) in eine Höhenkarte umgerechnet werden (Abb. 37 b). Hier ist zu gewährleisten, dass die Höhenkarte eine entsprechend hohe Auflösung aufweist, damit sich die errechnete polygonale Geometrie hinreichend genau der ursprünglichen Struktur annähert (Abb. 37 c).

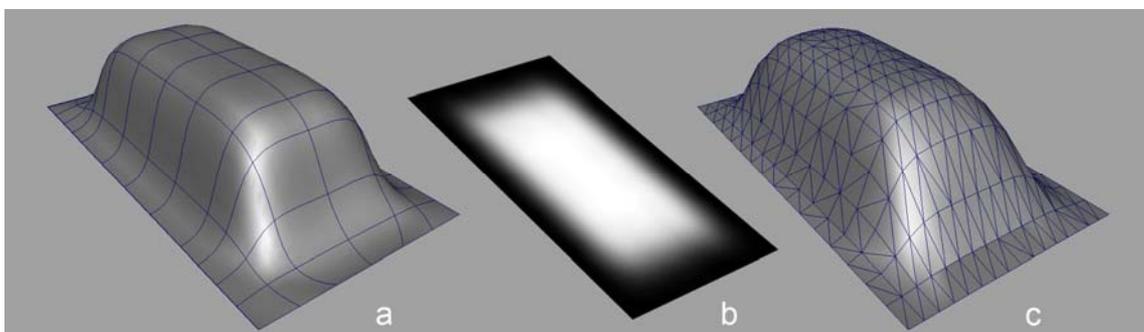


Abb. 37: Strukturelement dargestellt als NURBS, Höhenkarte, Polygon (v.l.)

7.4.3 Strukturentwicklung durch grafische Bearbeitung der Höhenkarte

Besonders bei unregelmäßigen, »organischen« Mustern kann die Entwicklung der Struktur durch direkte Erstellung der Displacement-Map von Vorteil sein. Als Grundlage für die Höhenkarte kann jede beliebige Bilddatei dienen, wobei die Helligkeitswerte der einzelnen Bildpunkte als Höheninformation interpretiert werden. Geeignet sind z.B. durch herkömmliche Flachbett-Scanner erzeugte Bilder von existierenden Oberflächen. Die Höheninformationen werden bereits näherungsweise abgebildet, da weiter entfernte Bereiche des Originals von der Scanneroberfläche weniger Licht reflektieren. Für ein realitätsnahes Ergebnis muss das Original jedoch eine einheitliche Farbe und einen konstanten Reflektionsgrad besitzen.

Fotografierte Objekte können im Allgemeinen nur als Grundlage zur Strukturentwicklung dienen. Durch unterschiedliche Farbigkeit der abgebildeten Objekte, durch Schattenwurf oder Reflektion wird eine direkte Verwendung zur Erstellung von Höhenkarten erschwert (Abb. 38).

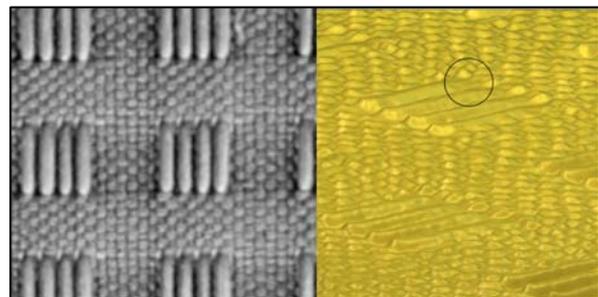


Abb. 38: Fehler durch Schattenwurf

Auf die Gestalt der Struktur kann nun gezielt Einfluss genommen werden, indem die Bildvorlage durch ein Grafikprogramm verändert wird. Durch verschiedene Grafikfilter oder Anpassung von Helligkeit und Kontrast lassen sich bestimmte Eigenschaften der Vorlage verstärken oder beseitigen (Abb. 39). Bei dieser eher intuitiven Vorgehensweise müssen die Anpassungen regelmäßig überprüft werden, indem die Höhenkarte durch ein geeignetes Programm in ein dreidimensionales Relief umgewandelt wird.

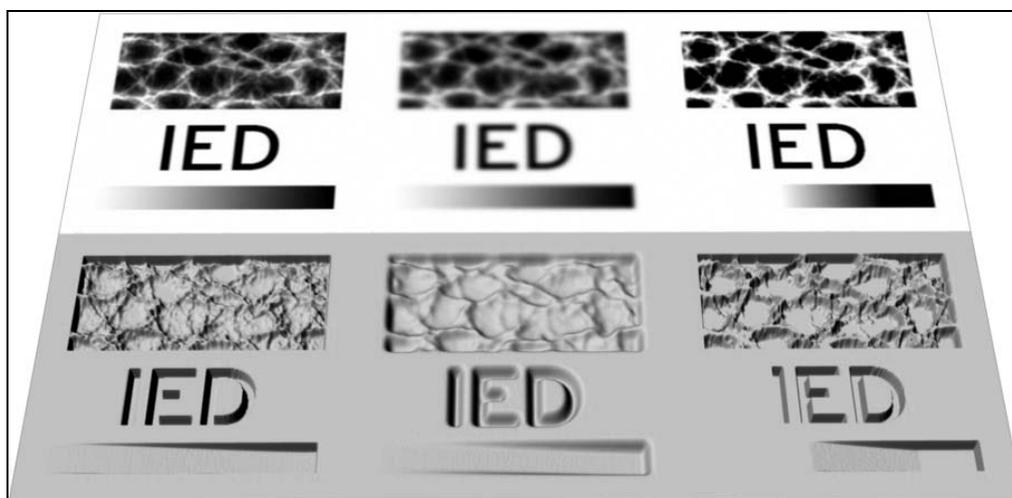


Abb. 39: Höhenkartenmanipulation (v.l.): Original, Unschärfefilter, Kontrast

7.4.4 Größe der Vorlagenstruktur

Um große Bauteile strukturieren zu können, wird es meist erforderlich sein, Strukturen so zu entwerfen, dass sie nahtlos aneinander gefügt werden können. Die Größe einer Kachel ist dabei stark von der Art der Struktur abhängig.

Bei regelmäßigen, sich wiederholenden Strukturen genügt es, ein einzelnes Strukturelement zu modellieren; bei unregelmäßigen organischen Strukturen wird der zu wiederholende Bereich üblicherweise deutlich größer sein, damit Wiederholungen optisch nicht wahrnehmbar sind. In Einzelfällen kann es notwendig werden, dass eine Struktur für die Größe des gesamten Bauteils entwickelt wird.

Eine Wiederholung der Vorlagenstruktur hat keinen Einfluss auf die Datenmenge des gesamten strukturierten Bauteils. Daher ist es bei Strukturen, bei denen keine optischen Wiederholungen wahrnehmbar sein sollen, grundsätzlich von Vorteil, die Strukturkacheln möglichst groß auszubilden.

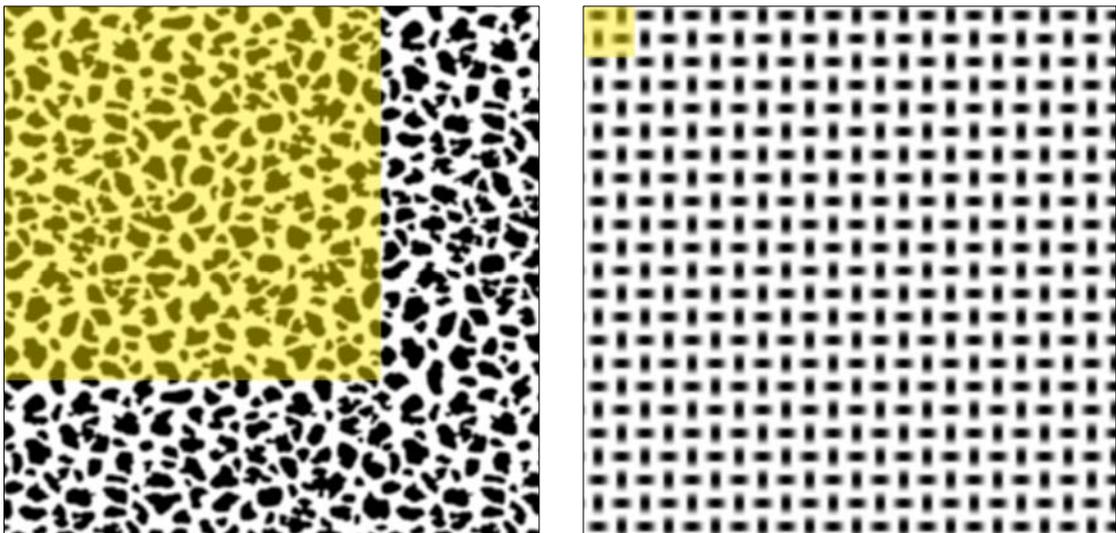


Abb. 40: Kachelgröße (gelb) bei unregelmäßiger und regelmäßiger Struktur

7.4.5 Digitale Strukturübertragung

Das zu strukturierende Bauteil muss zunächst zur digitalen Strukturübertragung vorbereitet werden. Das Verfahren des Displacement-Mappings ist nur auf Geometrien anwendbar, die in Polygonform vorliegen. Üblicherweise wird das Bauteil durch NURBS-Geometrien beschrieben sein, so dass eine Umwandlung in ein Polygon notwendig ist.

Die Anzahl und Größe der Teilflächen richtet sich nach der Auflösung der zu verwendenden Höhenkarte und der Komplexität der Bauteilgeometrie.



Da ein Polygonnetz aus ebenen Flächen zusammengesetzt ist, können Rundungen nur näherungsweise abgebildet werden. Das Polygonnetz muss demnach entsprechend stark tesseliert werden, so dass auch komplexe Bauteilformen hinreichend genau abgebildet werden.

Ferner ist zu gewährleisten, dass jedem Pixel der Höhenkarte ein Gitternetzpunkt des Polygons zugeordnet werden kann. Dieser Knoten wird später bei der dreidimensionalen Strukturberechnung entsprechend seiner Höheninformation (ausgedrückt durch den Farbwert des zugeordneten Pixels) in Richtung der Flächennormalen verschoben. Zwischen benachbarten Punkten werden Dreiecksflächen aufgespannt, so dass eine »wasserdichte« Oberfläche entsteht.

Legt man eine Auflösung der Höhenkarte von 500 Pixel/cm oder 1270 dpi zugrunde, dürfen die Kontrollpunkte des Polygonnetzes einen maximalen Abstand von 20 µm aufweisen. Verschiedene 3D-Programme (u.a. Autodesk Maya®) bieten die Option an, Einzelflächen erst während der Displacement-Berechnung noch weiter zu unterteilen. In dem Fall kann mit einem gröber aufgelösten Polygonnetz gearbeitet werden. Es muss jedoch auch hier gewährleistet sein, dass das unstrukturierte Polygonnetz die ursprüngliche NURBS-Bauteilgeometrie hinreichend genau abbildet.

Sollte die Bauteilgeometrie bereits in Polygonform vorliegen, muss auch hier sichergestellt werden, dass das Polygonnetz für das Displacement-Mapping ausreichend Knoten aufweist. Im Allgemeinen muss eine weitere Tessellierung der Flächen nach oben genannten Gesichtspunkten erfolgen.

7.4.6 Textur und Texturkoordinaten

Die genaue Platzierung der Struktur auf der Oberfläche wird durch Texturkoordinaten definiert. Diese sog. UV-Koordinaten bestimmen die Lage einer Textur auf dem Polygonnetz und werden den Polygonflächen zunächst während des Modellierungsprozesses automatisch durch das CAD-Programm zugewiesen. Durch verschiedene Bearbeitungsschritte (z.B. Verzerrung der Geometrie, Boolesche Operationen, Konvertierung von NURBS in Polygone) können diese jedoch so verändert worden sein, dass die Textur verzerrt abgebildet wird. In diesem Fall müssen die UV-Koordinaten neu erstellt werden.

Zur genauen Bestimmung der Lage der Textur auf dem Bauteil wird zunächst die Bauteilgeometrie möglichst verzerrungsfrei auf eine Ebene abgewickelt. Diese zweidimensionale Darstellung der Texturkoordinaten kann nun mit einer Bilddatei überlagert werden. Mit Hilfe eines speziellen Textureditors wird daraufhin die Position der einzelnen Texturkoordinaten (und somit der Teilflächen der Bauteiloberfläche) auf der Textur bestimmt (Abb. 41).

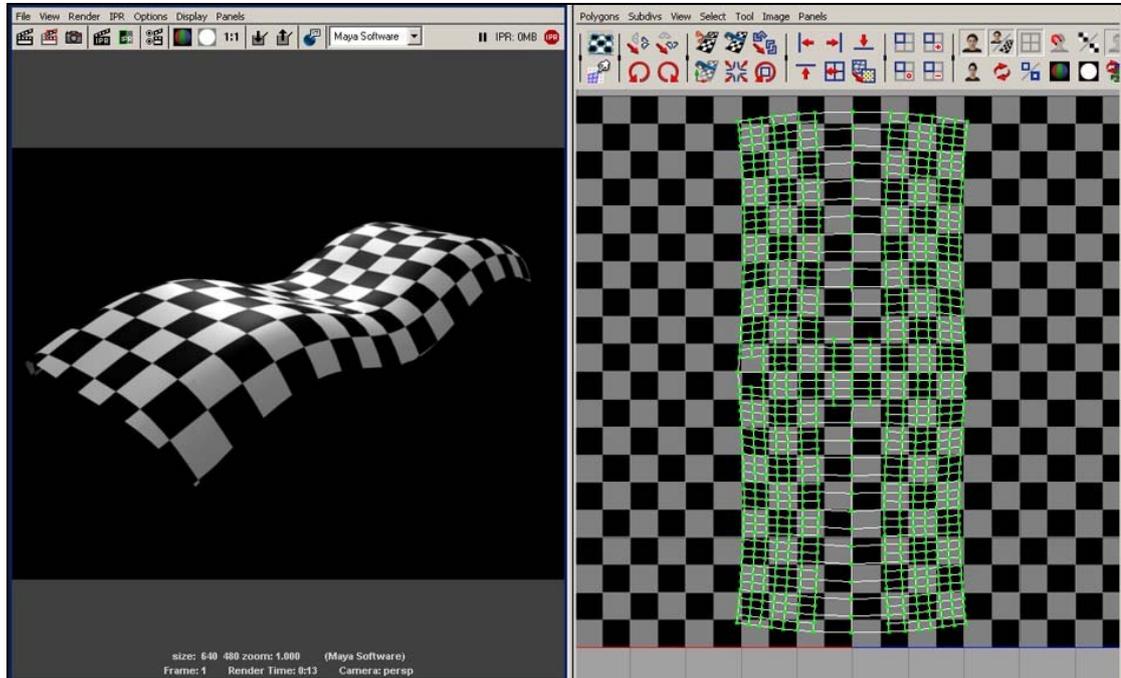


Abb. 41: Textureditor des Programms Autodesk Maya®

Während die Abwicklung für geometrisch einfache Formen größtenteils automatisch vom CAD-Programm vorgenommen werden kann, sind bei komplexen Geometrien meist mehrere manuelle Arbeitsschritte notwendig.

Zusammenhängende, beliebig geformte Oberflächen können aus geometrischen Gründen meist nicht ohne weitere Bearbeitung verzerrungsfrei auf eine Ebene abgewickelt werden. Um Verzerrungen zu minimieren, müssen für diese Geometrien Kanten definiert werden, an denen die Oberfläche getrennt wird, bevor sie auf eine ebene Fläche »gezogen« werden kann. Dieser Vorgang, der an das Abhäuten von Tierfellen erinnert, kann durch ein verbreitetes Hilfsprogramm namens »Pelting Tools for Maya¹« wesentlich beschleunigt werden.

Hier wird die Oberfläche nach dem Definieren der erforderlichen Schnittkanten in einen virtuellen Rahmen gespannt (Abb. 42 links) und im folgenden Schritt vom Programm auseinander gezogen. Die Schnittkanten sollten so gewählt werden, dass beim Glattziehen möglichst wenig Spannungen auftreten, so ist gewährleistet, dass die einzelnen Teilflächen ihre ursprünglichen Proportionen weitgehend behalten (Abb. 42 rechts).

¹ "Pelting Tools for Maya", Autor: Sunit Parekh, <http://sunitparekh.com/pelting/>

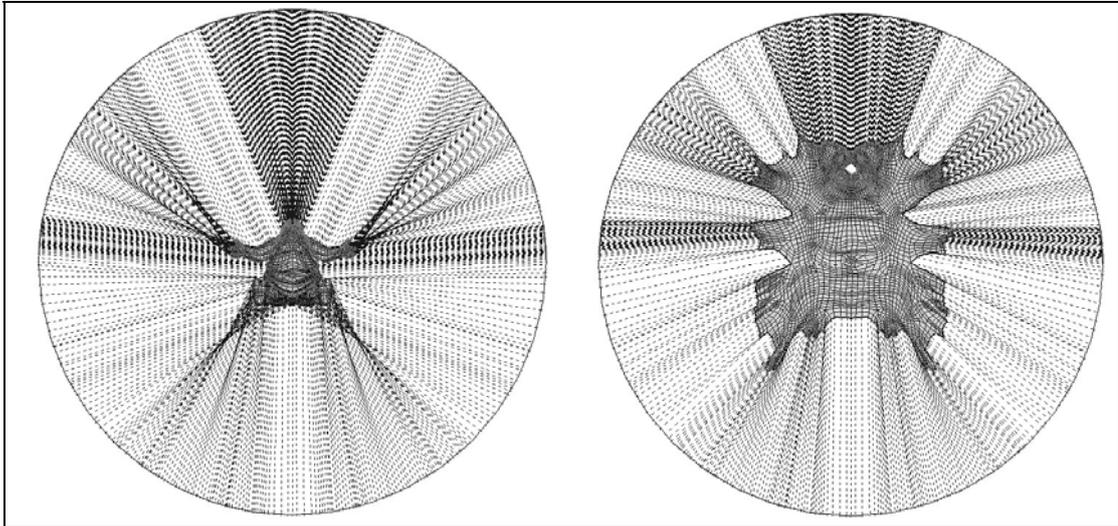


Abb. 42: Pelting-Tools, UV-Koordinaten vor und nach der Abwicklung

Durch Zuweisung einer regelmäßigen Struktur (z.B. Schachbrettmuster) kann nun das Resultat überprüft und ggf. im Textureditor noch optimiert werden.

7.4.7 Zuweisung der Struktur und Berechnung der strukturierten Oberfläche

Die Abwicklung der UV-Texturen kann für den nächsten Bearbeitungsschritt nun als Bitmap gespeichert werden. Anhand dieses "Schnittmusters" der Oberfläche kann nun die Gestaltung der Höhenkartentextur erfolgen. Hierzu wird das Bitmap der UV-Koordinaten in einem Grafikprogramm eingelesen und mit der Höhenkarte der Struktur überlagert. Mit Hilfe dieser Vorlage kann nun die Höhenkarte an die spezielle Geometrie des Bauteils angepasst werden.

Die korrekte Lage der Struktur, bzw. der Strukturdetails wird im Modell überprüft, indem die modifizierte Grafikdatei im 3D-Programm eingeladen und der Bauteiloberfläche zugewiesen wird. Gegebenenfalls können noch Korrekturen an den UV-Koordinaten oder an der Bilddatei vorgenommen werden.

Da zu diesem Zeitpunkt noch keine dauerhafte dreidimensionale Umrechnung erfolgt ist, kann eine Überprüfung der 3D-Struktur durch ein Rendering erfolgen. Hier wird die Struktur während der Berechnung temporär erzeugt und das Ergebnis als Bitmap dargestellt. Die endgültige Umrechnung kann erfolgen, sobald sämtliche Anpassungen der Struktur an das Bauteil vorgenommen wurden.

Um lokale Änderungen an der Oberflächenstruktur vorzunehmen, besteht neben der direkten Änderung der Höhenkarte in einem Grafikprogramm auch die Möglichkeit, in dem 3D-Programm Einfluss auf die Displacement-Map zu nehmen. Das Programm Autodesk Maya® bietet eine »Paint-On-Surface«-Funktion an, mit wel-



cher mit der Maus direkt auf die 3D-Oberfläche gemalt werden kann. Durch Übermalen der Höhenkarte kann so z.B. lokal die Strukturhöhe auf dem Bauteil reduziert werden. Auf ähnliche Art können mittels einer Stempelfunktion Logos oder Schriftzüge aufgebracht werden.

Nach Optimierung der Texturkoordinaten und der Höhenkarte kann die dreidimensionale Geometrie der strukturierten Bauteiloberfläche dauerhaft errechnet werden. Hierzu wird die Höhenkarte aus dem Farbkanal entfernt und in den Displacement-Kanal geladen. Von nun an werden die Farbinformationen der Höhenkarte tatsächlich zur Bestimmung der Höhenänderung benutzt. Zu diesem Zeitpunkt wird auch die maximale Höhe der Struktur angegeben.

Die Umwandlung der Displacement-Informationen in ein polygonales Gitternetz ist, je nach Größe des Bauteils und Genauigkeit der Struktur, ein rechenintensiver Vorgang und kann erhebliche Datenmengen produzieren, die teilweise die Kapazität gängiger Computersysteme überschreiten.

Da für die Bearbeitung durch das CAM-System ohnehin eine Segmentierung des Bauteils erfolgen muss, sollte die Unterteilung vor der Berechnung der dreidimensionalen Struktur erfolgen. Die einzelnen Segmente können nun getrennt voneinander berechnet und an das CAM-Modul weitergegeben werden.

7.4.8 3D-Segment-Prozess

Segment-Toolpath

Die Strukturierung der Werkzeugoberfläche durch die Laser-Apparatur erfolgt segmentweise, das Datenmodell der strukturierten Bauteiloberfläche muss daher anhand mehrerer Segmentierungsvorschriften aufgeteilt werden. Die maximale Größe eines Segments ist zunächst durch das Laser-Arbeitsvolumen (hier $30 \times 30 \times 2.4 \text{ mm}^3$) vorgegeben. Kann ein Segment der Bauteiloberfläche nicht innerhalb dieses Volumens abgebildet werden, muss es entsprechend verkleinert werden. Des Weiteren ist zu beachten, dass ein minimaler Krümmungsradius der Oberfläche innerhalb des Segments von $r_{\min}=60\text{mm}$, bzw. ein Winkel von $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}}=12^\circ$ nicht unterschritten werden darf (siehe Kap. 7.5.4). Auch wenn diese Bedingungen erfüllt sind, kann es abhängig von der Rechenkapazität der CAM-Rechner erforderlich sein, die Oberfläche in kleinere Segmente zu unterteilen, um die anfallenden Datenmengen in Grenzen zu halten.

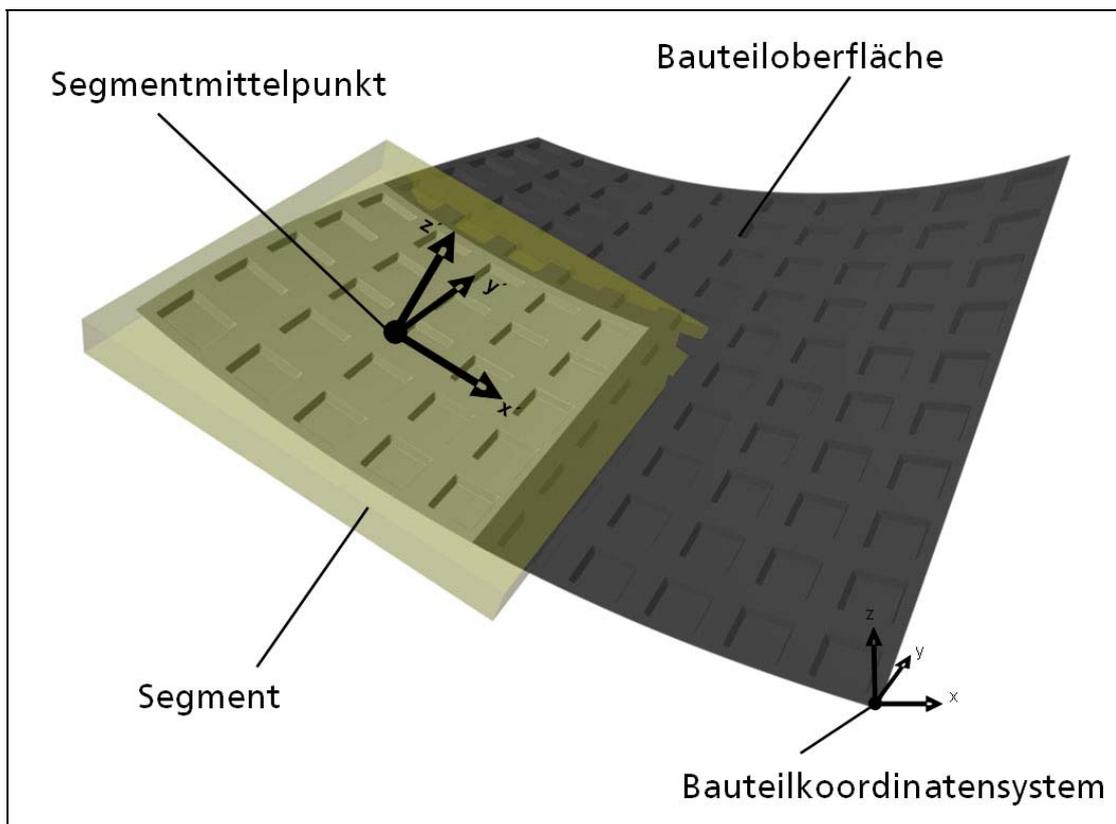


Abb. 43: Bauteilsegmentierung (schematisch)

Zur Vermeidung eines »Kacheffekts« in der strukturierten Bauteiloberfläche werden die Trennkanten üblicherweise nicht-linear ausgebildet und die einzelnen Segmente somit verzahnt. So kann die Entstehung von sichtbaren Trennlinien (bedingt durch Positionierungsungenauigkeiten der Maschine im μm -Bereich) umgangen werden. Die Trennkante verläuft dabei in der Segmenttrennzone durch Bereiche mit minimaler Strukturtiefe.

Aus dem digitalen Datenmodell des strukturierten Bauteilsegments werden im Folgenden die Bearbeitungsbahnen für das Lasertool (»Segment-Toolpath«) mit Hilfe eines CAM-Programms generiert (Abb. 44). Die für die Berechnung der NC-Bahnen notwendigen Parameter (wie Werkzeugdurchmesser, Schichttiefe, Pulsüberlapp, etc.) werden der Technologie- und Prozessdatenbank (siehe Kap. 7.5.6) entnommen.

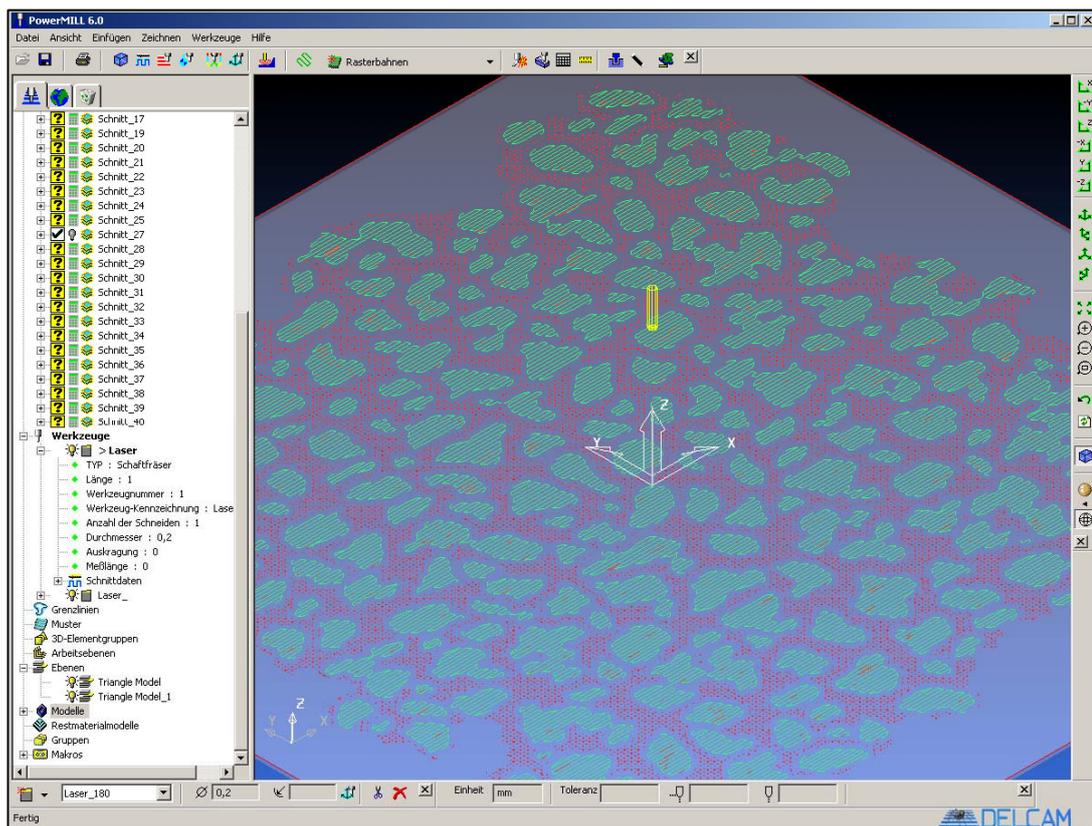


Abb. 44: Segment-Toolpath-Berechnung durch DELCAM PowerMill 6.0



Ein Post-Prozessor generiert aus den berechneten Bearbeitungsbahnen ISO-NC-Code, der zur Steuerung des Lasers um zusätzliche Befehle erweitert wird (Tab. 2). Dieser Code wird von einer am Fraunhofer IPT entwickelten Software-Applikation »NCProfiler-FlexOStruk« eingelesen und zur Steuerung des Lasermoduls eingesetzt.

Befehl	Funktion
M300	Laser Off
M301	Laser On (Mark Line)
M302	Laser On (Mark Point)
M400	Diode Output 0 %
M401	Diode Output 1 %
.....
M499	Diode Output 99 %
M1000	JumpSpeed 0 mm/s
...	
M1999	JumpSpeed 999 mm/s

Tab. 2: zusätzliche NC-Code-Befehle

Global-Toolpath

Zur Bearbeitung des gesamten Werkzeugs werden sequentiell die einzelnen Segmente durch das Laser-Modul bearbeitet. Hierzu müssen die Segmente relativ zum Werkzeug ausgerichtet werden, die Anfahrbewegungen der Werkzeugmaschine werden durch den sog. Global-Toolpath (Abb. 45) definiert.

Zur Berechnung der Bewegungsführungsdaten für die Werkzeugmaschine werden die Mittelpunkte der Segmente und deren Orientierung an das CAM-System übergeben. Ferner wird zur Kollisionsüberprüfung die (unstrukturierte) Bauteilgeometrie benötigt. Die errechneten Bewegungsführungsdaten werden von einem Post-Prozessor in ein von der Werkzeugmaschinensteuerung (hier: Heidenhain iTNC530) lesbares Programm überführt. Dabei werden spezielle Handshake-Signale eingefügt, mit welchen die Maschinensteuerung mit der Lasersteuerung kommunizieren kann. Über solche Signale wird zum Beispiel die Lasermodulsteuerung angewiesen, mit der Segmentstrukturierung zu beginnen, nachdem ein Segmentmittelpunkt angefahren wurde.

```

0 BEGIN PGM Test_v1 MM ; Programmstart
1 L X0 Y0 Z0 F200 ; Mittelpunkt 1. Laserfeld
2 L M401 ; Lasererweiterung ON
3 FN19: PLC=52074.1/4 ; Scanner-Back-End-Command (hier Lasertool)
4 FN19: PLC=52074.2/17 ; Scanner-Back-End-Data (hier T17)
5 L M410 ; Befehl auslesen über SPS (NC-Stopp bis
; Laser-Busy-Signal aufgehoben)
6 FN19: PLC=52074.1/1 ; Scanner-Back-End-Command (hier Scannerprogramm)
7 FN19: PLC=52074.2/1 ; Scanner-Back-End - Data (hier 1.nc)
8 L M410 ; Befehl auslesen über SPS (NC-Stopp)
9 L M411 ; Scanner Start über SPS (NC-Stopp)
10 L X-20 Y+0 F100 ; Mittelpunkt 2. Laserfeld
11 FN19: PLC=52074.1/1 ; Scanner-Back-End-Command (hier Scannerprogramm)
...
25 LM400 ; Lasererweiterung OFF

```

Abb. 45: Auszug eines Global-Toolpath-NC-Satzes

7.4.9 Lasermodulsteuerung durch »NCProfiler - FlexOStruk«

Die Initialisierung und Steuerung des Laser-Moduls erfolgt durch eine vom Fraunhofer IPT entwickelte Software-Applikation »NCProfiler-FlexOStruk« (Abb. 46). Die ISO-NC-Daten des Segment-Toolpaths werden hier in entsprechende Steuerungskommandos für die RTC3-Scannerkarte und dem Laser überführt. Der Technologie- und Prozessdatenbank werden die hierfür notwendigen Prozessparameter entnommen.

Die Kommunikation zwischen der Maschinensteuerung Heidenhain iTNC530 (Global-Toolpath) und der Lasermodulsteuerung »NCProfiler« (Segment-Toolpath) verläuft bidirektional per ProfiBus-System. So wird die Lasermodulsteuerung angewiesen, einen bestimmten Datensatz zu laden und mit der Bearbeitung zu beginnen. Nach erfolgreicher Bearbeitung signalisiert daraufhin »NCProfiler« der Maschinensteuerung, dass mit dem nächsten Datensatz des Global-Toolpaths fortgefahren werden kann. Auf diese Weise ist ein vollautomatischer Prozessablauf gewährleistet.

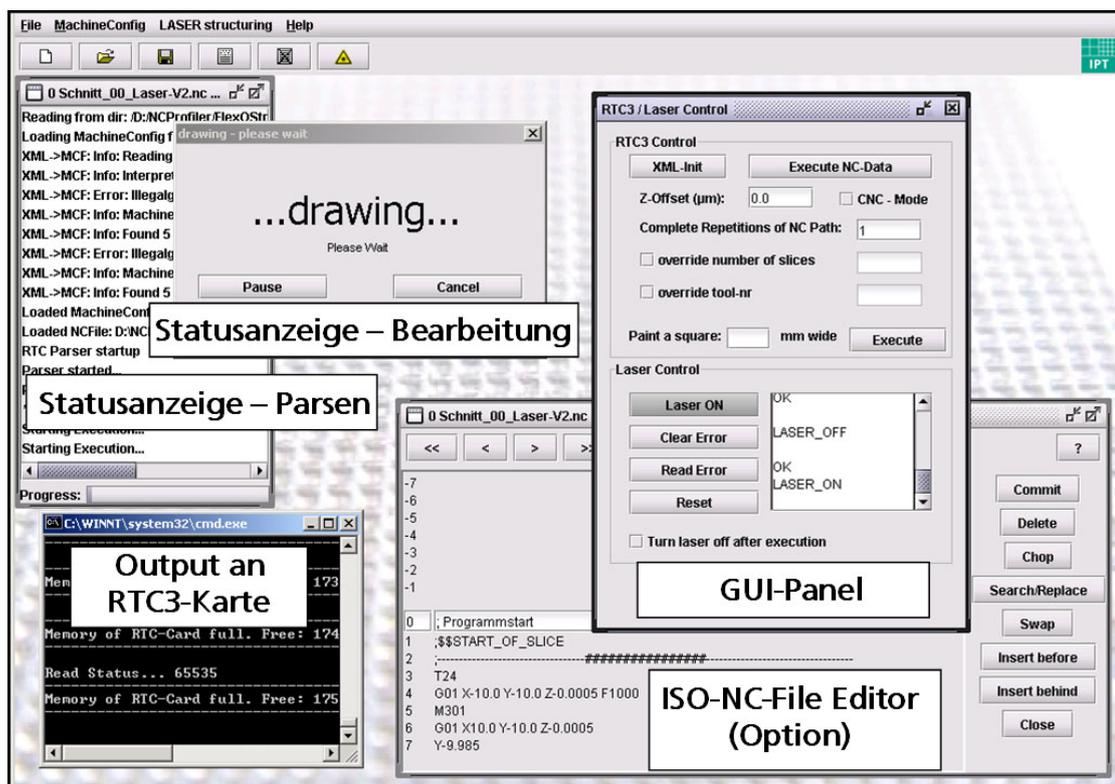


Abb. 46: Plattformsystem »NCProfiler-FlexOStruk« ©1999-2007 Fraunhofer IPT

7.5 Untersuchungen zum 3D-Laserstrahlstrukturieren

Zu Beginn der prozesstechnologischen Untersuchungen wurde eine Justage des Lasermoduls und eine messtechnische Bestimmung aller verfügbaren Betriebsparameter des Lasermoduls durchgeführt, um ein grundlegendes Verständnis für die Arbeitsweise des Lasermoduls aufbauen zu können. Durch praktische Versuche wurden Laserparameter zur Herstellung eines homogenen, reproduzierbaren und schmelzfreien Laserabtrags in eine Stahloberfläche erarbeitet. Dies erfolgte durch komplexer werdende Abtragversuche, beginnend bei der Betrachtung des Einzelpulses über den Grabenabtrag bis hin zu aufwändigen 3D-Strukturen. Dabei wurden prozesstechnologische Abhängigkeiten der Parameter untereinander erkannt und gegebenenfalls optimiert. Zum Abschluss wurden die erarbeiteten Prozessparameter in der bereits definierten Prozess- und Technologiedatenbank als Laser-Tools abgebildet. In Hinblick auf den 3D-Segment-Prozess wurden die entwickelten Prozessparameter auf die zuvor erarbeiteten Bearbeitungsstrategien übertragen, wobei dies sowohl für ebene als auch für frei geformte Regeloberflächen durchgeführt wurde. Dabei wurden Multiplikationsstrategien zur nahtlosen Kachelung erarbeitet, die anhand von Testbearbeitungen mit unterschiedlichen Strukturformen auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht wurden.

7.5.1 Justage und Kalibrierung des Lasermoduls

Justage

Innerhalb der Justage des Strahlengangs wurde der unfokussierte Laserstrahl exakt in die Eingangsaperturen der Fokussiereinheit und des 2-Achs-Scanners eingefädelt. Zur Sicherstellung eines optimalen Bearbeitungsergebnisses muss der Laserstrahl deckungsgleich mit der optischen Mittelachse der beiden Systemkomponenten verlaufen, da sonst Leistungsverluste durch Streustrahlung oder verfälschte Ablenkungen des Laserstrahls durch eine außermittige Bestrahlung der Scannerpiegel auftreten können.

Planparallelität

Für einen gleichmäßigen Abtrag über den gesamten Arbeitsbereich ist die Planparallelität zwischen Werkstückebene und Scanneroptik entscheidend. Abbildung 47 zeigt Auflichtmikroskopaufnahmen einer polierten Bauteiloberfläche mit partiell ausgebildeten Abtragbereichen aufgrund von einer Verkippung der Arbeitstisch- zur Scanneroptikebene. Durch einen sukzessiven Justagevorgang weist der Endzustand einen homogenen Abtrag auf, so dass keine Verkippung mehr besteht.

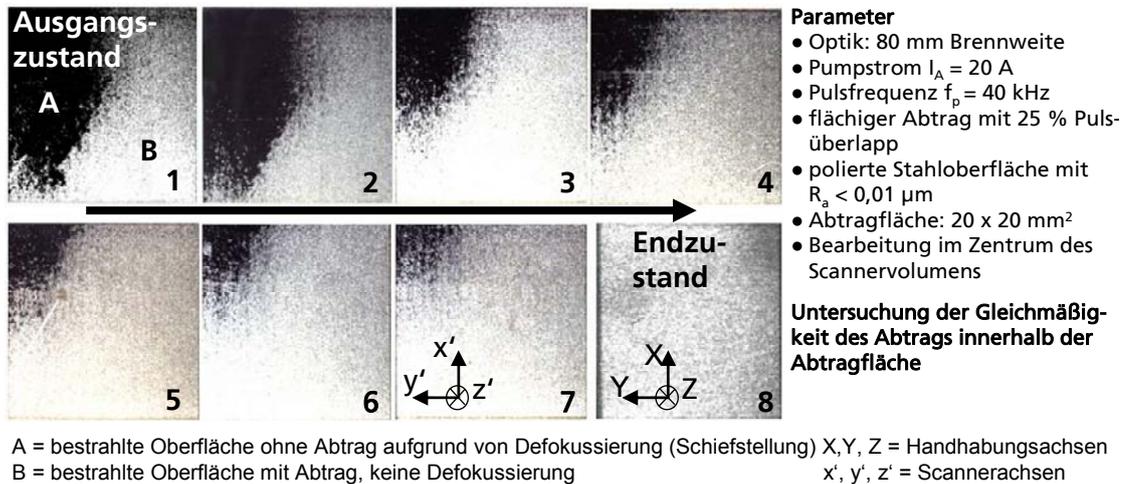


Abb. 47: Justage des Scannersystems hinsichtlich der Verkippung in der x' - y' -Ebene

Scanner-Verzerrung

Durch den Strahlverlauf im Scanner (Optik) liegen tonnenkissenförmige Verzerrungen in der quadratischen Abbildungsebene vor. Zur deren Reduzierung werden spezifische, vorgefertigte Kompensationstabellen von der RTC3-Steuerung genutzt. Diese Tabellen sind jedoch auf die maximale Eingangsapertur des Scanners ausgelegt. Bei der Nutzung einer kleineren Scanner-Eingangsapertur erfolgt eine Größenänderung der Abbildungsebene, so dass x' , y' und z' verzerrt abgebildet werden. Die Abweichung kann durch unabhängige Kompensationsfaktoren für die einzelnen Achsen (x' -, y' - und z' -gain) minimiert werden. Zur Bestimmung der gain-Faktoren für die x' - und y' -Achskompensation wurden quadratische Felder in eine ebene Bauteiloberfläche mittels Laser eingebracht. Nach einer Längenmessung der Abtragergebnisse mittels eines Messmikroskops konnten die entsprechenden Korrekturwerte bestimmt werden. Bei der z' -Kompensation wurde ein Strahlkaustikmessgerät vom Typ MicroSpotMonitor der Firma Primes genutzt, welches eine Fokusverschiebung zu einer Referenzposition entlang der z' -Achse messen kann.

7.5.2 Bestimmung der Betriebsparameter des Lasermoduls

Der Sublimationsabtrag wird maßgeblich durch physikalische Prozesse wie die Kinetik des Phasenübergangs, die Schmelzbad- sowie die Plasma-Dynamik beeinflusst. Diese Effekte werden ihrerseits durch die Verfahrensparameter (z. B. Abtragstrategie), die Materialeigenschaften (z. B. Verdampfungstemperatur) sowie die Laserstrahlparameter (z. B. Pulsenergie) bestimmt. Die bedeutendste Kenngröße der Laserstrahlparameter ist die mittlere Strahlintensität $I_{M, Laser}$, welche die mittlere Strahlungsenergie bezogen auf die fokussierte Strahlfläche darstellt. Deren bestimmende Größen (Gleichung 1) sind von entscheidender Bedeutung und werden daher hier als direkte Laserstrahlparameter bezeichnet:

$$I_{M,Laser} = \frac{P_{Puls}}{r_f^2 \cdot \pi} = \frac{P_D}{f_p \cdot r_f^2 \cdot \pi \cdot \tau_p} \quad [W/cm^2] \quad (\text{Gleichung 1})$$

Zur Bestimmung der verfügbaren mittleren Strahlintensitäten $I_{M,Laser}$ des Lasermoduls wurden die in Gleichung 1 auftretenden Kenngrößen des Laserstrahl messtechnisch bestimmt.

Vermessung der Pulslänge

Die Erzeugung von Laserpulsen basiert bei der hier verwendeten Laserstrahlquelle auf nicht-stationäre Methoden (Q-Switching durch Pockelzelle), so dass sich bei einer Veränderung der energetischen Zustände im Laser-Resonator, z. B. durch Erhöhung der Pumpleistung, die Pulslänge τ_p verändert. In Abbildung 48 wird ersichtlich, dass hier durch geeignete Parametervariation die Pulslänge τ_p zwischen 5 und 19 ns verändert werden kann.

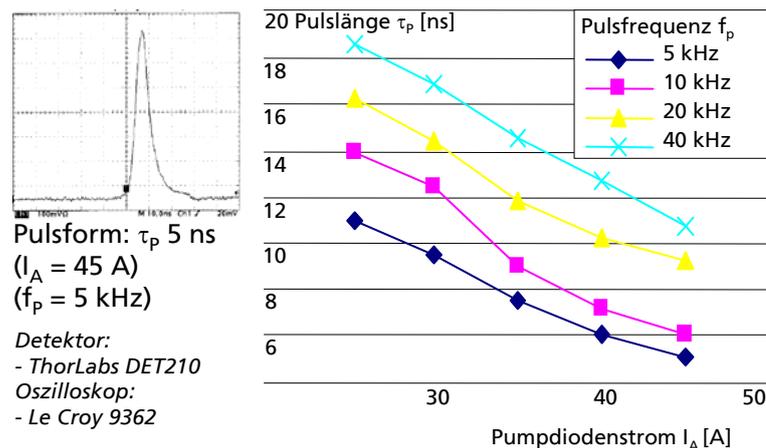


Abb. 48: Pulslänge τ_p mit variierter f_p und I_A

Dauerleistungen im Pulsbetrieb sowie strahlengangsbedingte Verluste

Infolge der Strahlführung über Spiegel und der Strahlformung durch die Optik liegen nichtlineare Verluste durch Reflexion und Absorption gegenüber der Nennleistung bzw. direkt nach Strahlaustritt aus dem Laser vor. Exemplarisch für $f_p = 5$ kHz verdeutlicht Abbildung 49 die Dauerleistung im Pulsbetrieb P_D und dessen Verluste in Abhängigkeit von I_A an unterschiedlichen Messpunkten. Bei einer Pulsfolgefrequenz f_p von 3 bis 40 kHz und einem Pumpdiodenstrom I_A von 20 bis 45 A liegen nach der Planfeldoptik Leistungsverluste zwischen 9,7 % und 19 % gegenüber dem direkten Strahlaustritt aus dem Laser vor. Die größten Verluste treten jeweils bei $f_p = 5$ kHz und $I_A = 45$ A auf, was auf die erhöhten thermischen Belastungen der optischen Komponenten zurückzuführen ist.

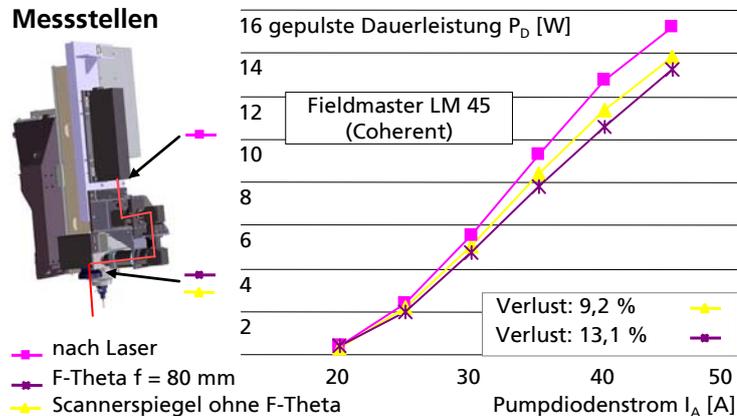


Abb. 49: Pulslänge τ_p mit variierter f_p und I_A

Bestimmung des Fokusbereichs und des Arbeitsabstands

Mittels eines MikroSpotMonitors wurden die Fokusbereich d_f in Abhängigkeit vom Pumpdiodenstrom I_A und von der Pulsfrequenz f_p messtechnisch bestimmt (86 %-Methode). Aus Abbildung 50 (links) wird ersichtlich, dass der Fokusbereich d_f über I_A und f_p nicht konstant ist. Es liegt eine große Streuung des Fokusbereichs d_f vor, was durch das besondere Linsendesign der telezentrischen Optik in Verbindung mit dem variierenden Rohstrahldurchmesser d_{Roh} zu begründen ist.

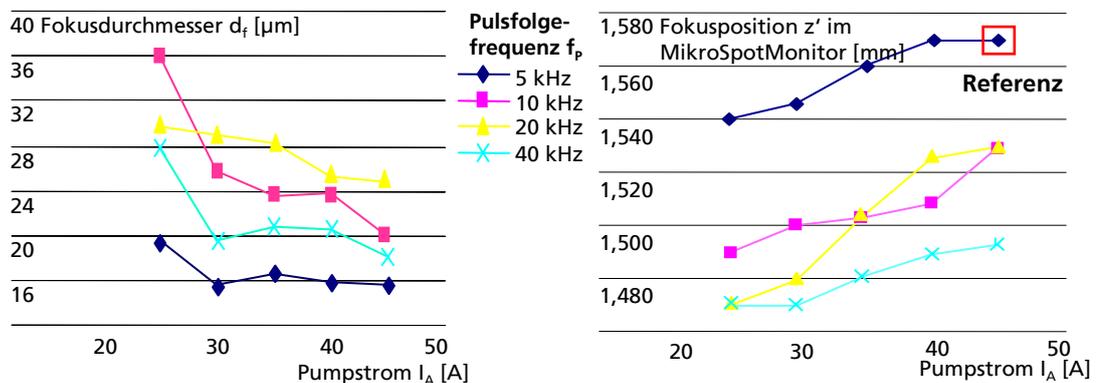


Abb. 50: Messtechnisch erfasste Fokusbereich und -positionen

Die Lage des Fokuspunkts in z' -Richtung ändert sich in Abhängigkeit vom verwendeten Laserparameter (Pumpstrom I_A und Frequenz f_p) (Abbildung 50, rechts), welches auf eine unterschiedliche Ausbildung der thermischen Linse im Laser zurückzuführen ist.

Für die Realisierung des 3D-Segment-Prozesses ist die exakte Positionierung des Bauteils zum Lasersegment entscheidend, insbesondere muss der Fokuspunkt exakt auf der Bauteiloberfläche liegen. Da jedoch die Z-Achse eine Positionierungsgenauigkeit aufweist, müssen die bestehenden nutzbaren Arbeitsbereiche des Fokus entlang der z' -Achse bestimmt werden. Der Arbeitsbereich Az' wird zum

einen durch die Rayleighlänge z_R und zum anderen durch die Qualität der Strahlform (Bedingung: stets TEM_{00} -Mode = Gauss) begrenzt. Für die Lasermaterialbearbeitung sollte der Arbeitsbereich innerhalb der Rayleighlänge liegen [WEIK06, S. 49]. Mit dem MikroSpotMonitor wurden die realen Rayleighlängen messtechnisch bestimmt und Strahlkaustikvermessungen zur Bestimmung der Strahl-Modi durchgeführt. In Abbildung 51 sind exemplarisch die einzelnen Strahlformen für $I_A = 40$ A und $f_p = 10$ kHz entlang der z' -Achse dargestellt, wobei ein maximaler TEM_{00} -Arbeitsbereich von $A_{TEM_{00}} = -300/+100$ μm vorliegt. Für diesen Betriebspunkt liegt eine gemessene Rayleighlänge von $z_R = 151$ μm vor, so dass ein Arbeitsbereich Az' von $-150/+100$ festgelegt wird.

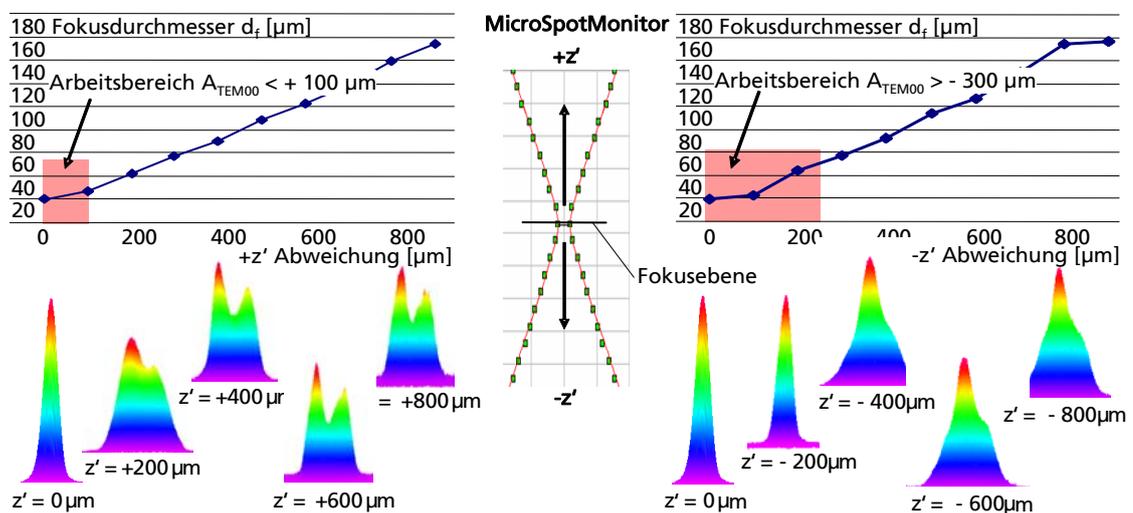


Abb. 51: Strahlkaustik und Strahlprofile ($I_A = 40$ A, $f_p = 10$ kHz)

Mittlere Strahlintensität

Aus den bestimmten Pulslängen τ_p , den realen Strahldurchmessern d_f und den verlustbehafteten Dauerleistungen im Pulsbetrieb P_D wurden für die einzelnen Betriebspunkte der Laserstrahlquelle die vorliegenden mittleren Strahlintensitäten $I_{M,Laser}$ berechnet. Abbildung 52 zeigt den Verlauf von $I_{M,Laser}$ über I_A und f_p .

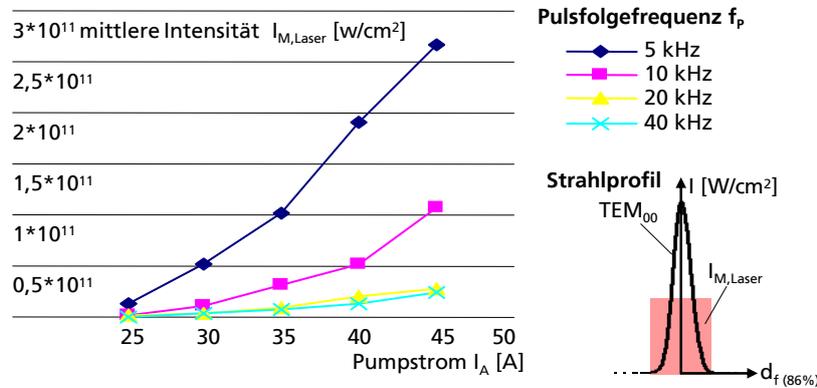


Abb. 52: Berechnete mittlere Strahlintensitäten $I_{M,Laser}$

Alle bestimmten Kenngrößen des Laserstrahls wurden in die Technologie- und Anlagendatenbank abgebildet, wobei der Parameter mit $I_A = 45$ A und $f_p = 5$ kHz als Bezugspunkt dient und hierauf referenzierte Kompensationen bestimmt wurden.

7.5.3 Theoretische Betrachtung des Abtragprozesses

Seitens der Materialkennwerte ist die Absorption einer der wesentlich beeinflussenden Parameter beim Sublimationsabtrag. Die Absorption bestimmt das Maß der Energieumwandlung und wird neben dem Material durch die Atmosphäre, die Temperatur, die Oberflächengüte und dem Einstrahlwinkel bestimmt [POPR05a, S. 33-35]. Daher wurde die gerichtete Absorption für 1.2767 bei unterschiedlichen Oberflächenrauheiten R_a und Strahlauftreffwinkeln $\Delta\tilde{n}$ bestimmt. Abbildung 53 (rechts) zeigt den relativen Reflexionsverlauf R_G in Abhängigkeit vom Winkel $\Delta\tilde{n}$. Es wird ersichtlich, dass bei einem Winkel $\Delta\tilde{n} = 10^\circ$ die gerichtete Reflexion R_G um ca. 60 % ansteigt. Bei der geschliffenen Oberfläche kann somit eine Absorptionsverminderung von 40 % bei $\Delta\tilde{n} = 10^\circ$ abgeschätzt werden, welches zu einem verminderten Abtrag bei gewölbten Oberflächen führt.

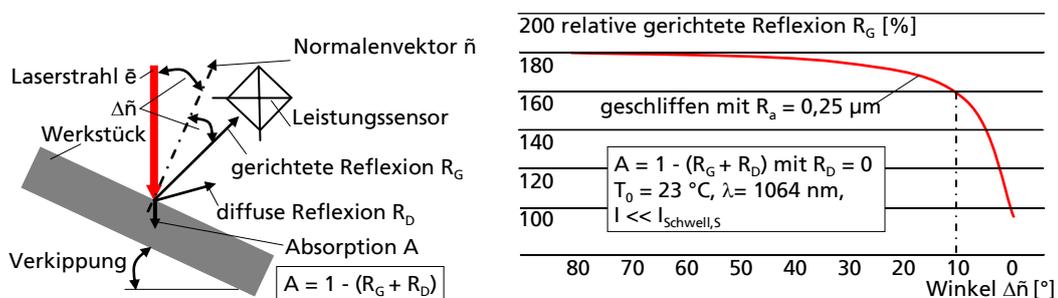


Abb. 53 : Relative, gerichtete Reflexion R_G in Abhängigkeit vom Winkel $\Delta\tilde{n}$

Aus den im Projekt durchgeführten theoretischen Überlegungen konnte ein Zusammenhang zwischen der Abtragqualität/ -quantität und der Laserstrahlintensi-

tät aufgestellt werden (Abbildung 54). Ziel der praktischen Untersuchungen war es, den Laserstrahlabtragprozess in einem Parameteroptimum auszulegen, in dem die höchstmöglichen Abtragraten und -qualitäten vorliegen. Die untere Grenze des Parameteroptimums wird durch die Reflexionsabnahmeschwelligkeit $I_{\text{Schwell,V-R}}$ und die obere Grenze durch die Plasmaabschirmschwelligkeit $I_{\text{Schwell,V-A}}$ definiert.

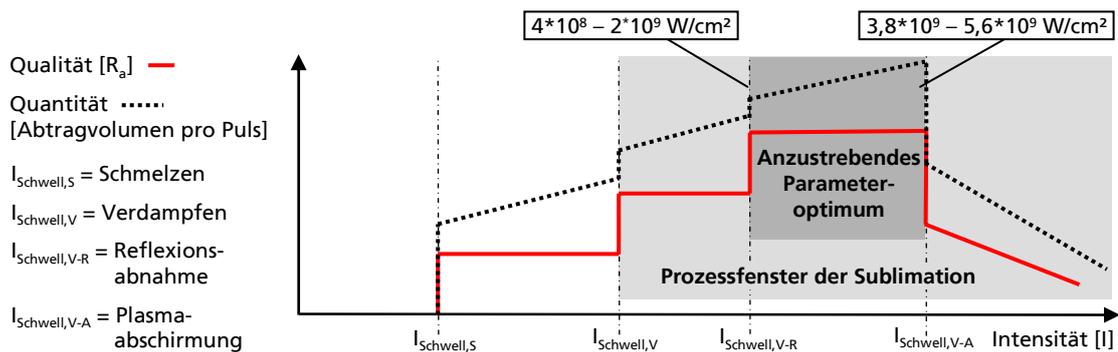


Abb. 54: Definition des optimalen Prozessparameterbereichs

7.5.4 Grundlegende Abtragversuche

Einzelpulsabtrag

Beim Abtrag des Materials 1.2767 weisen Einzelpulse nachfolgende Kenngrößen auf (Tab. 3).



Pumpstrom I_A			25 A	30 A	35 A	40 A	45 A
Abtragtiefe	t_{Abtrag}	μm	1,7	1,6	1,9	2,7	2,8
Abtragsdurchmesser	d_{Abtrag}	μm	19	15,7	19,8	14,64	15,6
WEZ-Durchmesser	d_{WEZ}	μm	49,5	52,2	57	58,7	66,2
Arbeitsbereich	$A'_{z'}$	μm	-75/0	-75/75	-75/25	-100/50	-75/75
Fokusshift	$\Delta'_{z'}$	μm	-38	0	-25	-25	0
Pumpstrom I_A			25 A	30 A	35 A	40 A	45 A
Abtragtiefe	t_{Abtrag}	μm	2,4	1,7	1,9	2,3	2,4
Abtragsdurchmesser	d_{Abtrag}	μm	19	16,8	19,3	18	16,6
WEZ-Durchmesser	d_{WEZ}	μm	34,6	44,9	50	56,1	62,2
Arbeitsbereich	$A'_{z'}$	μm	-75/25	-75/0	-50/50	-75/75	-150/50
Fokusshift	$\Delta'_{z'}$	μm	-25	-38	0	0	-50
Pumpstrom I_A			25 A	30 A	35 A	40 A	45 A
Abtragtiefe	t_{Abtrag}	μm	2,9	2,3	1,7	2,1	2,6
Abtragsdurchmesser	d_{Abtrag}	μm	15,7	19,2	18	17,7	18
WEZ-Durchmesser	d_{WEZ}	μm	26,8	32,7	42,7	52,9	52
Arbeitsbereich	$A'_{z'}$	μm	-125/-50	-100/-25	-100/0	-125/-25	-125/-25
Fokusshift	$\Delta'_{z'}$	μm	-88	-68	-50	-75	-75
Pumpstrom I_A			25 A	30 A	35 A	40 A	45 A
Abtragtiefe	t_{Abtrag}	μm	2	3	2,1	2,2	2,9
Abtragsdurchmesser	d_{Abtrag}	μm	18,4	19,8	19,6	18,3	18,8
WEZ-Durchmesser	d_{WEZ}	μm	26,7	30,1	33,9	37,6	39,2
Arbeitsbereich	$A'_{z'}$	μm	-125/75	-125/25	-125/125	-75/50	-100/50
Fokusshift	$\Delta'_{z'}$	μm	-25	-50	0	-13	-25

$T_0 = 23^\circ\text{C}$; Raumluft; Normaldruck; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; gemittelte Ergebnisse; bezogen auf Referenzparameter: $I_A = 45 \text{ A}$; $f_p = 5 \text{ kHz}$

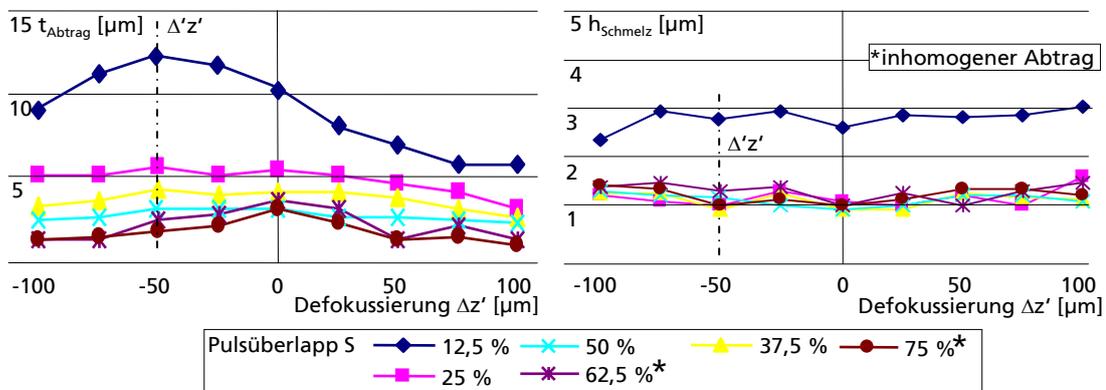
Tabelle 3: Kenngrößen der Betriebsparameter bei Einzelpulsabtrag (Hauptarbeitsparameter = ██████)

Der Betriebsparameter mit $f_p = 40 \text{ kHz}$ und $I_A = 30 \text{ A}$ weist den größten Abtrag pro Puls bei geringsten Schmelzablagerungen auf. Dieser Parameter arbeitet im Bereich der Reflexionsschwellintensität $I_{\text{Schwell},V-R}$. Da aufgrund der hohen Pulswiederholfrequenz auch die höchste Abtragleistung vorliegt, wird dieser Parameter als **Hauptarbeitsparameter** definiert. Grundsätzlich steigert eine He-Atmosphäre den Pulsabtrag insbesondere bei hohen Pulsspitzenleistungen aufgrund einer erhöhten Gas-Plasmaunterdrückung. Beim Hauptbearbeitungsparameter ist die Abtragsteigerung jedoch zu vernachlässigen. Die Realisierung einer He-Atmosphäre ist sehr kostenintensiv, so dass davon Abstand genommen wird.

Überlappungsabtrag

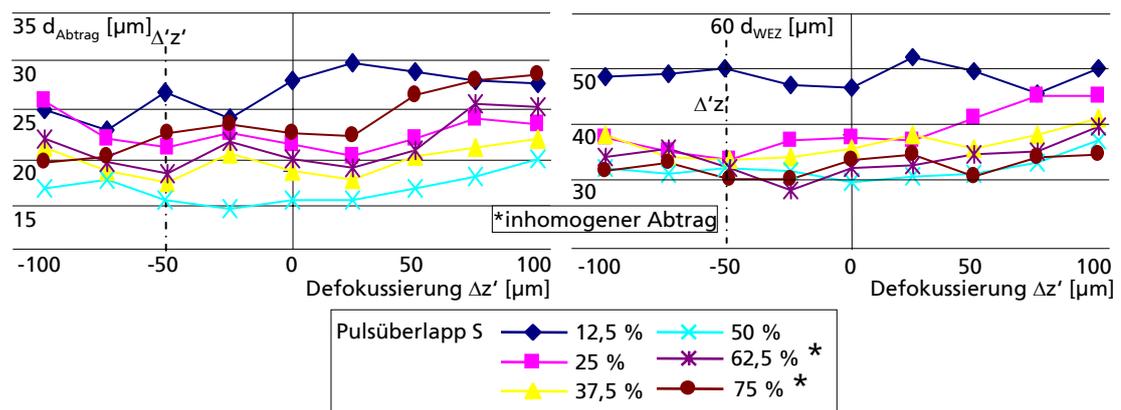
Durch einen definierten Hatchabstand H bilden Gräben, die wiederum durch den Pulsüberlapp S beeinflusst werden, die Grundlage des flächigen und voluminösen Abtrags. Es wurde daher der Einfluss des Pulsüberlapps S auf die qualitative und quantitative Ausbildung von Abtraggräben untersucht.

Im untersuchten Parameterregime liegen beim Hauptbearbeitungsparameter die besten Abtragergebnisse vor. Die Abbildungen 55 und 56 zeigen exemplarisch die Auswertung der Gräben-Abtragversuche für den Hauptbearbeitungsparameter.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$

Abb. 55: Einfluss des Pulsüberlapps S auf t_{Abtrag} und h_{Schmelz} ($I_A = 30 \text{ A}$; $f_p = 40 \text{ kHz}$)



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$

Abb. 56: Einfluss des Pulsüberlapps S auf d_{Abtrag} und d_{WEZ} ($I_A = 30 \text{ A}$; $f_p = 40 \text{ kHz}$)

Besonders homogene Abträge liegen beim Hauptbearbeitungsparameter in einem Pulsüberlappregime S zwischen 25 % und 50 % vor, dabei beträgt der Abtrag t_{Abtrag} im Mittel $4 \mu\text{m}$, die Schmelzkranzhöhe h_{Schmelz} etwa $1 \mu\text{m}$ und die Rauheit R_a



im Abtraggrund etwa $1 \mu\text{m}$. Mit abnehmendem Pulsüberlapp nimmt die Abtragtiefe t_{Abtrag} im Parameterregime zu. Die Vorschubgeschwindigkeit v_f nimmt mit zunehmendem Pulsüberlapp ab, so dass bei höheren Pulsüberlappen eine verringerte Bearbeitungszeit besteht.

Schichtabtrag

Ein flächiger Abtrag wird durch eine Aneinanderreihung von Einzelgräben erzeugt, wobei die wichtigsten Stellgrößen der Hatch H bzw. der Bahnabstand n und der eingesetzte Flächenverfahrzyklus sind. Über eine geeignete Stapelstrategie werden dann einzelne Abtragflächen schichtweise zu einem dreidimensionalen Abtrag zusammengesetzt. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, die Rauheit R_a im Abtraggrund zu minimieren und eine reproduzierbare Schichttiefe s zu erzielen. Zudem soll die Schmelzranderzeugung am Abtragrand auf ein Minimum verringert werden. Ein homogener flächiger Abtragprozess weist im Allgemeinen eine geringe Oberflächenrauheit R_a und Schmelzranderzeugung h_{Schmelz} auf.

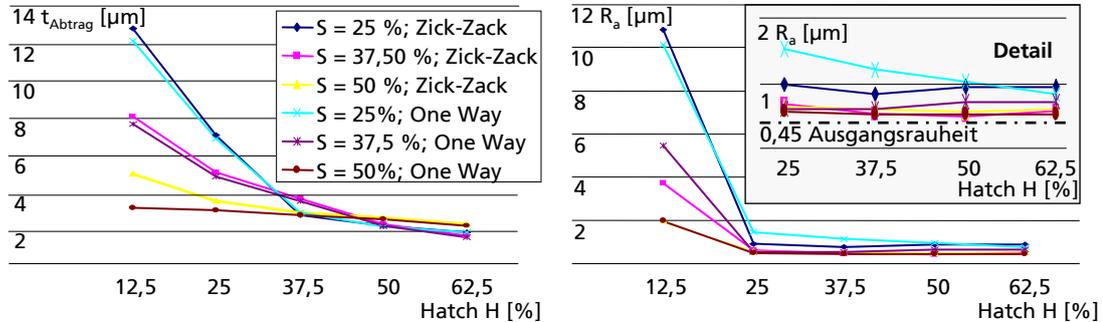
Flächenverfahrzyklen

Bei der Zick-Zack-Strategie kann der Laser aus systemtechnischen Gründen entlang der Zustellbahn nicht ab- und angeschaltet werden, weil die Signallauf- und Schaltzeiten des Lasers größer sind als das sich aufgrund des Zustellwegs ergebende Zeitintervall (hier Bahnabstand n). In diesem Bereich liegt stets ein zusätzlicher Abtrag vor.

Für die One-Way-Strategie wird im Vergleich zur Zick-Zack-Strategie eine erhöhte Bearbeitungszeit benötigt, weil im Leerhub kein Abtrag erfolgt. Der Leerhub wird vom Scanner als Jump umgesetzt, so dass durch eine separate Vorschubanpassung der Jump-Bewegung eine Verringerung des Zeitverlusts erfolgen kann. Außerdem erfolgt bei jeder Abtragbahn ein erneutes Anschalten der Laserstrahlquelle, so dass ein inhomogener Abtrag am Bahnanfang durch die mangelnde Start-Pulsstabilität des Lasers vorliegt.

Bei der Spiral-Strategie liegen die Zustellbahnen nicht wie bei der Zick-Zack-Strategie im Randbereich sondern innerhalb der Struktur vor. Die Abtragergebnisse zeigten, dass bei der Spiral-Strategie deutliche Markierungen im Bereich der Zustellbahnen auftreten. Diese sind auf einen höheren Abtrag zurückzuführen und vermindern die Oberflächenqualität. Daher findet die Spiral-Strategie keine weitere Verwendung.

Abbildung 57 zeigt die Auswertung der Abtragversuche mit Zick-Zack- und One-Way-Strategie, wobei die Jumpgeschwindigkeit v_{Jump} gleich der Vorschubgeschwindigkeit v_f ist.



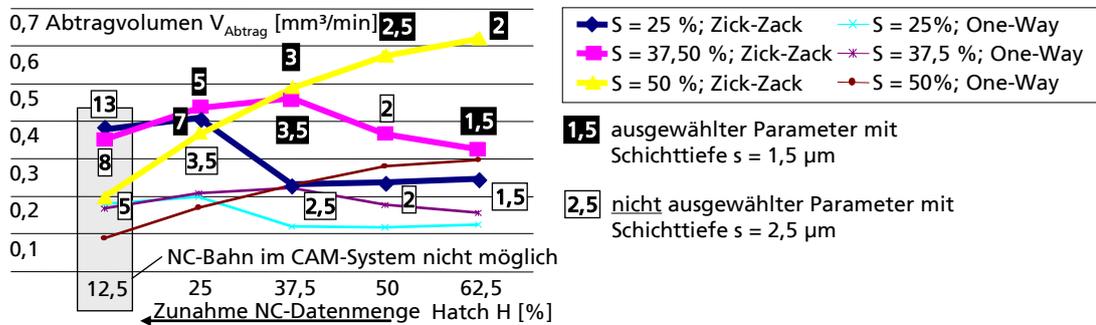
$I_A = 30 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \text{ µm}$;
gemittelte Ergebnisse; $v_{\text{Jump}} = v_f$

Abb. 57: Abtragtiefe t_{Abtrag} und Rauheit R_a bei variiertem Pulsüberlapp S , Flächenverfahrzyklus und Hatch H

Grundsätzlich liegen bei der Abtragtiefe t_{Abtrag} keine großen Unterschiede bei der Verwendung der verschiedenen Flächenverfahrzyklen vor. Weiterhin beträgt bei allen Parameterkombinationen der Schmelzaufwurf am Rand der Struktur h_{Schmelz} im Mittel etwa 25 % der Schichttiefe s . Lediglich bei der One-Way-Strategie sind im Start-Bereich der NC-Bahn stets ein erhöhter Schmelzaufwurf von $h_{\text{Schmelz}} \approx 0,75 t_{\text{Abtrag}}$ und ein erhöhter Abtrag festzustellen. Bei der Zick-Zack-Strategie treten im Zustell-Bereich nur erhöhte Schmelzaufwürfe im Falle eines niedrigen Hatches von $H = 12,5 \text{ %}$ auf, so dass dieser Parameter möglichst vermieden werden sollte. Die Zick-Zack-Strategie weist geringere Rauheitswerte und somit eine bessere Abtraggenauigkeit als die One-Way-Strategie auf. Dies ist mit einer kontinuierlicheren Energie- bzw. Wärmeeinbringung bei der Zick-Zack-Strategie zu erklären. Daher wurde die One-Way-Strategie nicht weiter eingesetzt.

Schichtparameter

In Abbildung 58 ist der Volumenabtrag pro Zeit für die einzelnen Parameterkombinationen dargestellt. Dabei muss die Schichttiefe s berücksichtigt werden, weil diese auf die Strukturabbildung in z -Richtung einen erheblichen Einfluss hat.



$I_A = 35 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$; $T_0 = 22^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; gemittelte Ergebnisse; $v_{Jump} = v_f$

Abb. 58: Erzielbare Abtragsvolumen und definierte Schichttiefen s

Es wurden nachfolgende Parameterkombinationen für feste Schichttiefen s definiert, wobei jeweils eine maximale Abtragsrate, eine minimale Oberflächenrauheit ($R_a \leq 1 \mu\text{m}$) und geringe NC-Datenmengen angestrebt wurden (Tabelle 4). Grundsätzlich nimmt die NC-Datenmenge mit höherem Hatch H ab. Die Parameterkombinationen und die sich daraus ergebenden greifbaren Kenngrößen werden in die Technologiedatenbank aufgenommen. Für die komplexeren Abtragversuche wurde ausschließlich die Zick-Zack-Strategie eingesetzt.

Schichtparameter	Schichttiefe s [μm]	Abtragsvolumenrate V_{Abtrag} [mm ³ /min]	Rauheit im Abtraggrund R_a [μm]	Pulsüberlapp S [%]	Hatch H [%]
P1	1,5	0,323	0,62	37,5	62,5
P2	2	0,616	0,67	50	62,5
P3	2,5	0,572	0,61	50	50
P4	3	0,5	0,64	50	37,5
P5	3,5	0,46	0,58	37,5	37,5
P6	5	0,432	0,74	37,5	25
P7	7	0,41	1,02	25	25

$I_A = 30 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; gemittelte Ergebnisse; $v_{Jump} = v_f$

Tabelle 4: Parameterkombinationen für optimierten Schichtabtrag mit Zick-Zack-Strategie

Stapelstrategie

Zur Erzielung größerer Abtragtiefen muss eine geeignete Stapelstrategie vorhanden sein. Diese soll möglichst eine konstante, minimale Oberflächenrauheit im Abtraggrund, steile Flanken und eine konstante Schichttiefe ermöglichen. Abbildung 59 zeigt die hier untersuchten Stapelstrategien in z' -Richtung. Im Gegensatz zur Stapelstrategie 2 weist Strategie 1 einen alternierenden Wechsel des Bahnorientierungswinkels um jeweils 90° bei jeder Schicht auf. Bei der Strategie 3 beträgt

der alternierende Winkel dagegen 45° . Durch den Bahnorientierungswinkel soll eine Abtragvorzugsrichtung bzw. ein zeiliger oder welliger Abtrag vermieden werden. Der Wechsel des Bahnorientierungswinkels erhöht jedoch den Berechnungsaufwand im CAM-System. Bei der Herstellung von mehrschichtigen Abträgen erfolgt bei jeder Schicht eine z' -Zustellung um die gewählte Schichttiefe s .

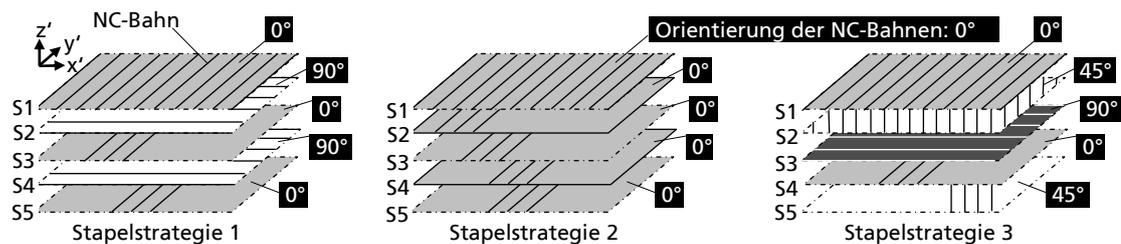
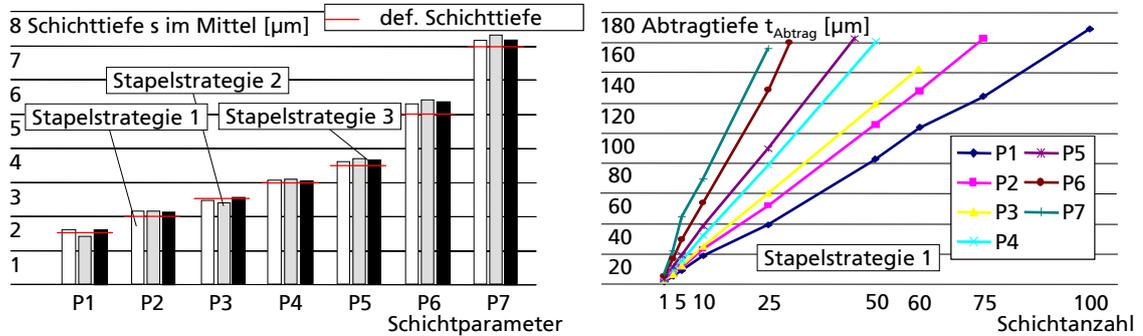


Abb. 59: Stapelstrategien in z' -Richtung für multiplikativen Schichtabtrag

Abbildung 60 zeigt die gemessene, über alle Schichtwiederholungen gemittelte Schichttiefe s für die verschiedenen Schichtparameter entsprechend den jeweiligen Stapelstrategien. Über alle Schichtparameter gemittelt weist Stapelstrategie 1 eine Abweichung der Schichttiefen von nur $+3,24\%$ gegenüber den zuvor definierten Schichttiefen auf. Strategie 3 besitzt eine nahezu vergleichbare Abweichung von $3,37\%$, Strategie 2 weist dagegen eine deutlich vergrößerte Abweichung von $5,29\%$ auf. In diesem Zusammenhang zeigt Abbildung 57 exemplarisch die Abtragtiefen für die einzelnen Schichtparameter und Schichtwiederholungen bei der Verwendung der Stapelstrategie 1. Dabei wird der nahezu lineare Verlauf der Abtragtiefe über die Schichtanzahl deutlich, so dass bei allen Schichtparametern von einer konstanten Schichtmultiplikation ausgegangen werden kann. Der auftretende übermäßige Abtrag kann durch eine entsprechende Reduzierung der Schichtanzahl teilweise kompensiert werden. Zudem weist die Stapelstrategie 1 geringste Rauheiten R_a sowie Schmelzränder h_{Schmelz} auf.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; gemittelte Ergebnisse; $v_{\text{Jump}} = v_f$;

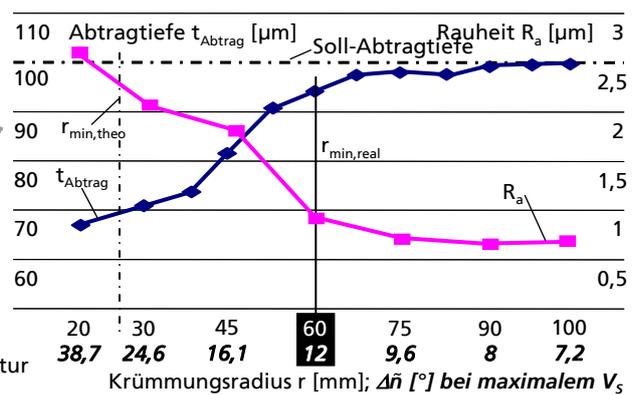
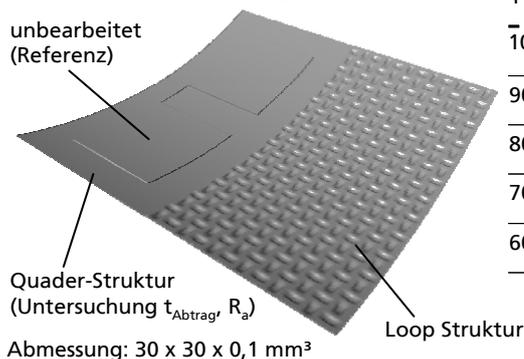
Abb.60: Schichttiefe s im Mittel je nach Schichtparameter Px

Abb. 57: Abtragtiefe t_{Abtrag} bei variiert Schichtanzahl

Minimal bearbeitbarer Krümmungsradius von gewölbten Oberflächen

Zur Übertragung der Parameter auf Freiformoberflächen wurde der Quaderabtrag in gewölbten Oberflächen näher untersucht. Dabei ist der innerhalb eines Segments minimal bearbeitbare Krümmungsradius r_{min} , einer gewölbten Fläche zu bestimmen. Es werden konkav gewölbte Oberflächen ($\Delta\tilde{n} > 0^\circ$; Krümmungsradius: $20 \text{ mm} \leq r \leq 100 \text{ mm}$) bei maximaler Ausnutzung des Scannerbearbeitungsvolumens V_5 strukturiert.

Teststruktur mit Krümmungsradius $r = 30 \text{ mm}$



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, gewölbte Oberflächen gefräst mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Stapelstrategie 1, Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; $v_{\text{Jump}} = v_f$

Abb. 61: Bestimmung des realen Krümmungsradiuses r_{min} anhand von Abtragversuchen

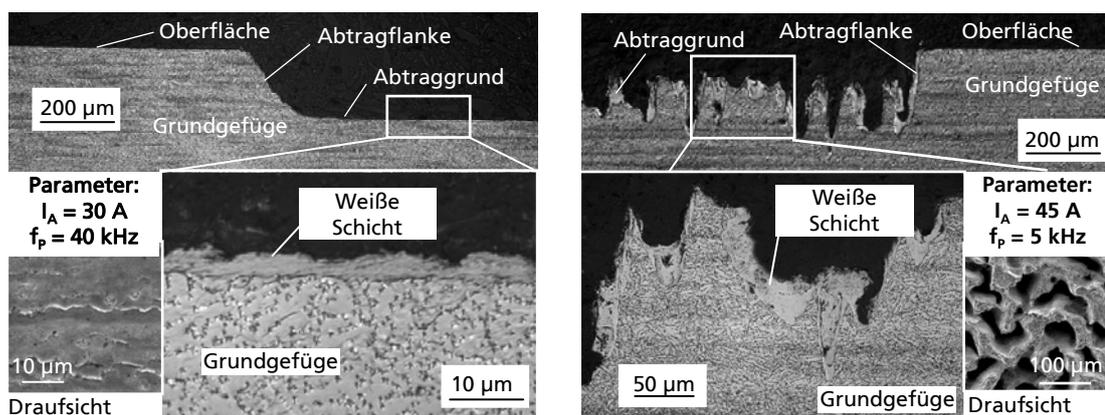
Bei Krümmungsradien r kleiner als 60 mm bzw. Winkeln $\Delta\tilde{n}$ kleiner als 12° ist eine deutliche Reduzierung der Abtragtiefe und eine starke Erhöhung der Rauheit zu

beobachten. Dies ist auf einen inhomogenen Abtragprozess zurückzuführen. Aufgrund des verwendeten Schichtverlaufs (z' -Level-Constant-Machining) verringert sich bei zunehmendem Krümmungsradius der Bearbeitungsanteil des Lasers pro Schicht, so dass die Anzahl der zu vermeidenden Anfangs- und Endzustände des Laserabtrags zunimmt. Weiterhin wird der Abtraggrund nicht durch eine einzelne homogene Schicht sondern durch die Randbereiche der Schichten erzeugt. Die am Randbereich entstehenden Schmelzrückstände bestimmen somit die Rauheit R_a im Abtraggrund. Nach Abbildung 61 konnte r_{\min} mit 60 mm festgelegt werden, so dass für die Segmentierungsvorschrift $\Delta\tilde{n}_{\text{Grenz}} = 12^\circ$ beträgt.

7.5.5 Metallurgische Betrachtung der abgetragenen Oberflächenrandzone

Die Standzeit von Spritzgießwerkzeugen wird u. a. durch die metallographischen Eigenschaften der Oberflächenrandzone bestimmt. Eine Begutachtung des hier vorliegenden Laserabtrags hinsichtlich der Ausbildung der Randzone (WEZ) wurde anhand metallographisch präparierter Abträge durchgeführt. Eine Präparation beinhaltet die Arbeitsschritte Trennen, Einbetten, Schleifen, Polieren und Gefügeätzen.

Abbildung 62 zeigt Auflichtmikroskop-Aufnahmen quergeschliffener und geätzter Quaderabträge, wobei der prozesstechnologische Unterschied nur in der Wahl der genutzten Laserstrahlintensität besteht. Beim Quaderabtrag in Abbildung 59 (links) wurde mit dem Hauptbearbeitungsparameter ($I_A = 30 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$) gearbeitet, bzw. in Abbildung 59 (rechts) wurde, um den Einfluss der Laserstrahlintensität auf die Ausbildung von Gefügeveränderungen besser deutlich zu machen, mit einer Intensität über der Plasmaabschirmschwelle bzw. mit dem Referenzparameter ($I_A = 45 \text{ A}$, $f_p = 5 \text{ kHz}$) gefertigt.

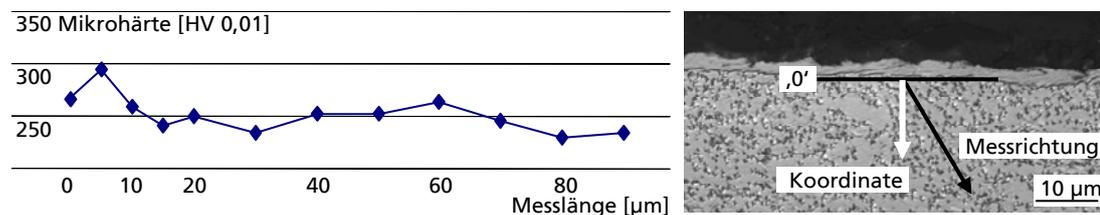


z' -Achse durch VarioScan nachgeführt; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Stapelstrategie 1, Schichtparameter P4; Schichtanzahl 50

Abb. 62: Metallurgisch aufbereiteter Querschliffe von Quaderabträgen

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der Abtrag durch den Hauptbearbeitungsparameter eine deutlich verbesserte Oberflächenrauheit und somit eine größere

Formgenauigkeit als der Abtrag durch den Referenzparameter aufweist. Beim Hauptbearbeitungsparameter sind keine Risse oder andere Oberflächenbeeinflussungen zu erkennen. Eine so genannte weiße Schicht weisen zwar beide Abträge auf, aber eine thermisch bedingte Veränderung des Grundgefüges (Umwandlungszone – WEZ) unterhalb der weißen Schicht ist anhand der Gefügeausbildung nicht festzustellen. In Abbildung 63 ist zur Absicherung dieser Beobachtung ein Mikrohärteverlauf (HV 0,01) dargestellt.



$I_A = 30 \text{ A}$; $f_p = 40 \text{ kHz}$; z'-Achse durch VarioScan nachgeführt; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \text{ µm}$; Stapelstrategie 1, Schichtanzahl 50; Schichtparameter P4

Abb. 63: Mikrohärteverlauf (HV 0,01) in der Randzone eines Quaderabtrags

Bei der durchgeführten Mikrohärtemessung nach Vickers wurde der Startpunkt der Messreihe (5 µm minimaler Messpunktabstand) zwischen weißer Schicht und Grundgefüge gesetzt (vgl. Abbildung 63, rechts). Bei einer relativen Messtiefe von ca. 5 µm ist ein leichter Anstieg der Mikrohärte gegenüber der Härte im Grundgefüge festzustellen, was jedoch aufgrund der schwierigen Messsituation und in Verbindung mit der fehlenden Gefügeumwandlung nicht als Indiz für eine Umwandlungszone angesehen werden kann. Die fehlende Ausbreitung der Umwandlungszone ist auf die sehr kurze Energieeinbringung durch ns-Pulsen zurückzuführen.

Mittels einer Martens-Härtemessung (HM 10 mN) konnte eine durchschnittliche Härte der weißen Schicht von HM 6160 (799 HV 0,1) bestimmt werden. Gemäß Literatur ist die beobachtete weiße Schicht eine durch Temperaturwechselwirkungen entstandene Zone, die kristallin aus Martensit und Zementit aufgebaut ist und einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweist. Es handelt sich dabei um aufgeschmolzenes und nach kurzer Zeit wieder erstarrtes Grundmaterial. Diese Zone entsteht auch beim Erodieren [SANC06]. Im Gegensatz zu der beim Erodieren auftretenden weißen Schicht ist die hier auftretende Schicht deutlich dünner, weist keine Risse auf und liegt gleichmäßig und homogen im Abtraggrund vor.

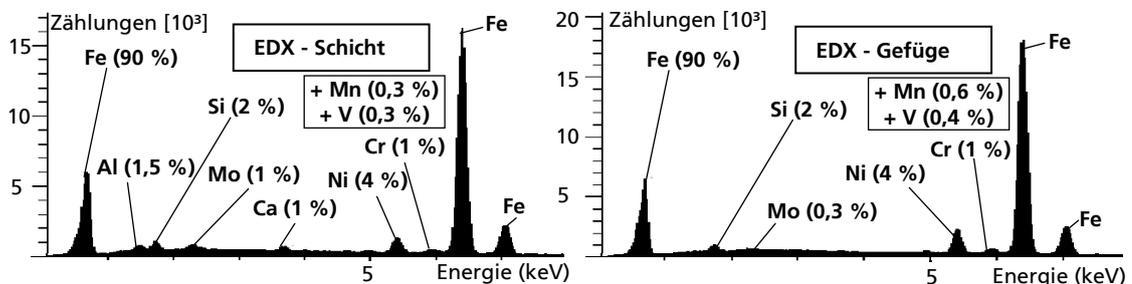


Abb. 64: EDX-Analyse der weißen Schicht (links) und des Grundgefüges – 1.2767 (rechts)

Abbildung 64 (links) zeigt eine EDX-Analyse der weißen Schicht, wobei die Elemente Aluminium und Calcium aus dem Einbettmittel stammen. Im Vergleich zur EDX-Analyse des Grundgefüges (Abbildung 64, rechts) bzw. zur Richtanalyse des Werkstoffs liegen keine nennenswerten Unterschiede in der Massenverteilung der chemischen Elemente vor, so dass, wie erwartet, von einer werkstoffgleichen Schicht ausgegangen werden kann. Eine deutliche Zunahme des Sauerstoffanteils, wie es bei der Bearbeitung mit fs- und ps-Lasern beobachtet wurde [WEIK06, S. 74], kann hier nicht bestätigt werden. Daher ist nicht davon auszugehen, dass es sich um ein Oxid handelt. Eine Bearbeitung unter unterschiedlichen Schutzgasatmosphären (Ar, He) ergab keine Veränderungen hinsichtlich der Ausprägung der weißen Schicht.

Die Ausbildung der weißen Oberflächenschicht wird nicht durch die Anzahl der verwendeten Abtragschichten beeinflusst, was durch Versuche nachgewiesen werden konnte. Da bei den Einzelpulsabträgen auch eine weiße Schicht im Abtraggrund zu beobachten ist, kann davon ausgegangen werden, dass die weiße Schicht bei jeder Abtragschicht erzeugt und von der darauf folgenden wieder entfernt wird. Aufgrund der kurzen Pulslängen und Puls wiederholraten ist eine nähere Untersuchung des Entstehungsprozesses z. B. mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera hier nicht möglich. Durch Versuche konnte nachgewiesen werden, dass die Dicke der weißen Schicht (hier zwischen 2,4-5,8 μm) sich mit zunehmendem Pulsüberlapp S / Vorschubgeschwindigkeit v_f und mit zunehmendem Hatch H vermindert.

7.5.6 Definierte Laser-Tools in Prozess- und Technologiedatenbank

Die erarbeiteten Bearbeitungsparameter werden in Form von Laser-Tools in der XML-basierten Prozess- und Technologiedatenbank abgelegt, so dass diese für die NC-Bahngenerierung im CAM-System oder die Segmentierung verfügbar sind. Neben den notwendigen, direkten Steuerungsparametern für das Lasermodul, wie Pumpstrom I_{Ar} , Pulsfrequenz f_p und Vorschubgeschwindigkeit v_f , enthalten die einzelnen Laser-Tools auch indirekte Parameter wie Abtragrate V_{Abtrag} , Rauheit R_a im Abtraggrund und Schichttiefe s . Abbildung 65 zeigt exemplarisch sowohl die direkten als auch die indirekten Parameter zweier Laser-Tools (T1 und T4) in der XML-Datenbank.



Parameter Type	Parameter Name	Value
direkte Parameter	tool_nr	1
	material	1.2767
	frequency	40000.0
	pumping_electricity	30.0
	voltage	6.06
	pulse_length	16,94
	focus_diameter	19,4
	dz_compensation	-0,1
	jumpspeed	396
	markspeed	396
	pulse_overlap	50
	hatch	37,5
	layer_distance	7,5
	layer_removal_depth	0
indirekte Parameter	roughness	0,64
	material_removal_rate	0,5
	material_removal_rate	0,323
	material_removal_rate	0,323

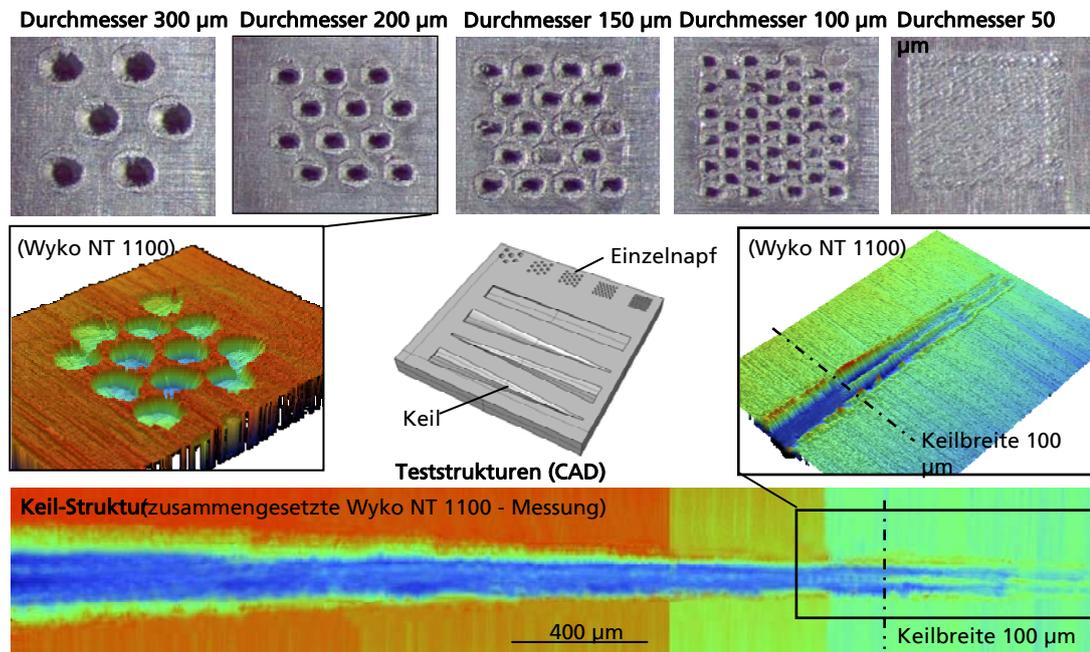
Parameter Type	Parameter Name	Value
direkte Parameter	tool_nr	4
	material	1.2767
	frequency	40000.0
	pumping_electricity	30.0
	voltage	6.06
	pulse length	16,94
	focus diameter	19,4
	dz_compensation	-0,1
	jumpspeed	396
	markspeed	396
	pulse_overlap	50
	hatch	37,5
	layer distance	7,5
	layer_removal_depth	0
indirekte Parameter	roughness	0,64
	material_removal_rate	0,5
	material_removal_rate	0,5
	material_removal_rate	0,5

Abb. 65: Laser-Tools in der Prozess- und Technologiedatenbank

7.5.7 Komplexe 3D-Strukturen aus Einzelschichten

Minimal herstellbare Strukturgrößen

Im CAM-System wurden Bearbeitungsbahnen zur Herstellung von Einzelnapfchen mit unterschiedlichen Durchmesser (20, 40, 100, 150 und 200 μm) und von sich verjüngenden Keilen erzeugt. Anhand der Keile konnte die minimale NC-Bahnlänge in der x'-y'-Ebene sehr genau bestimmt werden, da eine nahezu stufenlose Verkleinerung erfolgte. Abbildung 66 verdeutlicht, dass ab einer NC-Bahnlänge von 100 μm keine homogene Strukturabbildung mehr vorliegt. Diese Limitierung wird durch die Abbildungsqualität der Einzelnapfchen verstärkt. Daraus wurde eine maximale Strukturauflösung der Prozesskette von 100 μm abgeleitet.

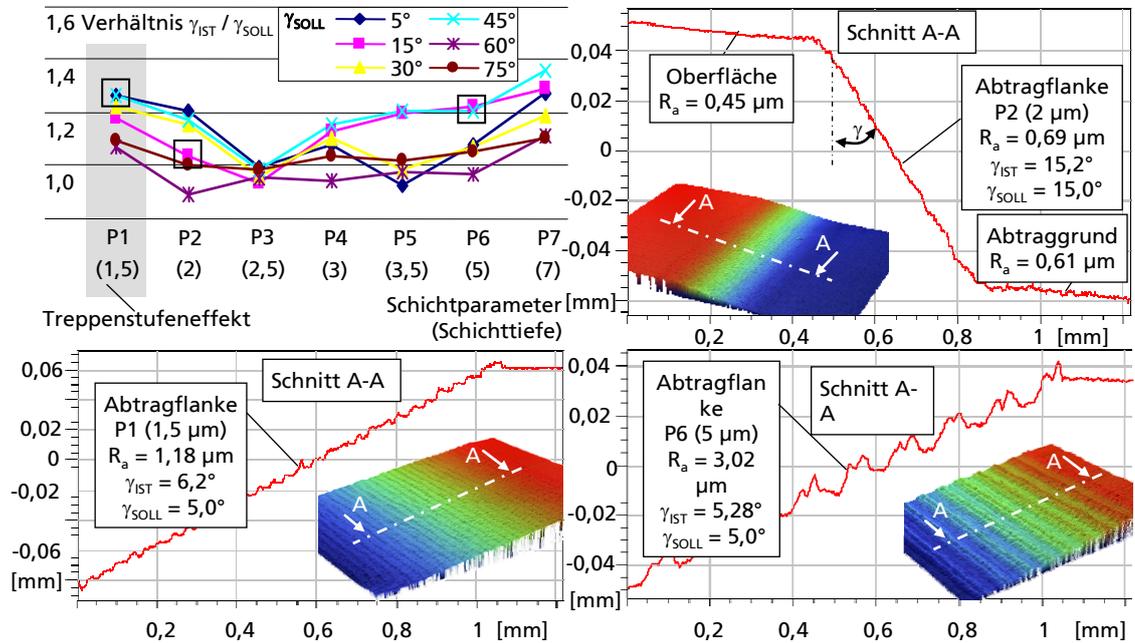


$I_A = 30 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Stapelstrategie 1; $v_{\text{Jump}} = v_f$; Schichtparameter P4

Abb. 66: Umsetzbare Strukturauflösung bei verschiedenen Strukturformen

Treppenstufeneffekt – gewählte Schichtdicke

Es wurde der Einfluss der Schichtdicke auf die Ausbildung des Treppenstufeneffekts untersucht. Dabei wurden Strukturen mit variierten Flankenwinkeln genutzt, wobei jeweils die für die Schichtparameter P_x entsprechende, aufgerundete ganzzahlige Schichtanzahl für die Erzielung einer Abtragtiefe von $100 \mu\text{m}$ verwendet wurden.



$I_A = 30 \text{ A}$, $f_p = 40 \text{ kHz}$; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; Material 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Stapelstrategie 1, gemittelte Ergebnisse aus 5 Versuchen; $v_{\text{Jump}} = v_f$

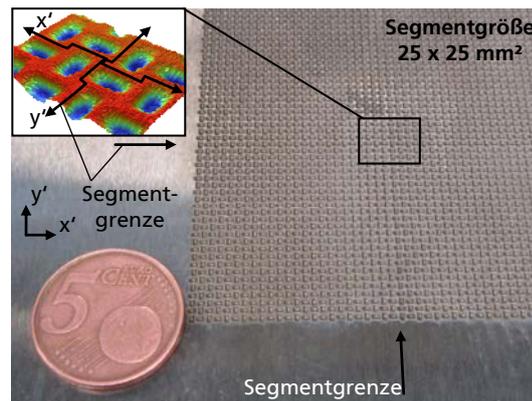
Abb. 67: Abhängigkeit zwischen verwendeter Schichtdicke (Schichtparameter P_x) und variiertem Abtragflankenwinkel γ ; Ausbildung des Treppenstufeneffekts

Strukturflanken mit einem Winkel von $\gamma = 5^\circ$ weisen stets eine deutliche Ausbildung von Treppenstufen auf, welche sich jedoch bei der Verwendung von geringeren Schichtdicken verkleinern. So ist die Rauheit R_a auf der Flanke beim Schichtparameter P1 mit $1,18 \mu\text{m}$ (Abbildung 64, unten links) deutlich reduziert gegenüber dem Schichtparameter P6 mit $3,02 \mu\text{m}$ (Abbildung 67, unten rechts). Bei vergrößerten Flankenwinkeln sind keine Treppenstufen mehr feststellbar, dies ist vor allem auf den höheren Überdeckungsgrad der einzelnen Schichten zurückzuführen (Abbildung 67, oben rechts). Hinsichtlich der untersuchten Flankenwinkel γ weist der Schichtparameter P3 (Schichtdicke $2,5 \mu\text{m}$) die geringsten Abweichungen zum Soll-Winkel auf, im Mittel beträgt diese -4% . Eine Erhöhung sowie eine Verringerung der Schichtdicke führt zu größeren Winkelabweichungen, so dass der Schichtparameter P3 das Optimum darstellt.

7.5.8 Strukturkachelung auf ebenen und gewölbten Oberflächen

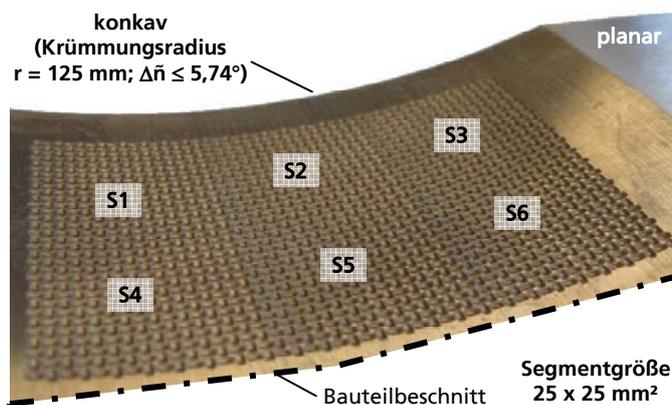
Mit den bis dato verfügbaren Bearbeitungsstrategien und -parametern konnten regelmäßige Strukturen auf ebene und gewölbte Oberflächen übertragen werden. Dabei wird jedes einzelne Segment in einem abgeschlossenen Bearbeitungsdurchgang hergestellt Sowohl bei ebener (Abbildung 68) als auch bei gewölbter Oberfläche (Abbildung 69) sind keine sichtbaren Nahtstellen zu beobachten bzw.

messtechnisch zu erfassen, da die Strukturtrennung in unbearbeitete Bereiche gelegt werden kann. Bei der ebenen und der gewölbten Oberfläche konnte eine Segmentgröße von $25 \times 25 \text{ mm}^2$ im CAM-System verarbeitet werden. Die gewölbte Oberfläche weist einen Krümmungsradius von $r = 125 \text{ mm}$ auf.



Hauptbearbeitungsparameter; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, Oberfläche mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; 4 quadratische Segmente

Abb. 68: Strukturkachelung auf ebener Oberfläche (Loop-Struktur)



Hauptbearbeitungsparameter; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, Oberfläche mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; 4 quadratische Segmente

Bild 69: Strukturkachelung auf konkaver Oberfläche (Loop-Struktur)

Die Strukturkachelung von vernetzten Strukturen (Leder) erforderte hingegen die Entwicklung von speziellen Kachelungsalgorithmen. In Abbildung 70 sind zwei Kachelungsalgorithmen für den 3D-Segment-Process schematisch dargestellt.

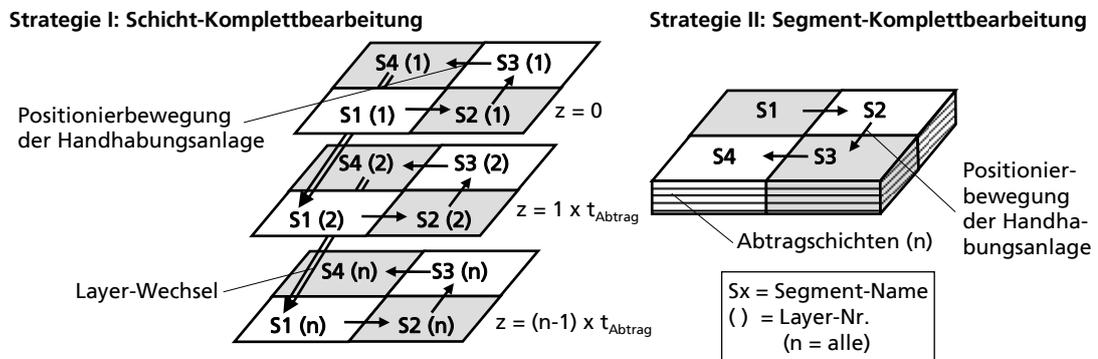
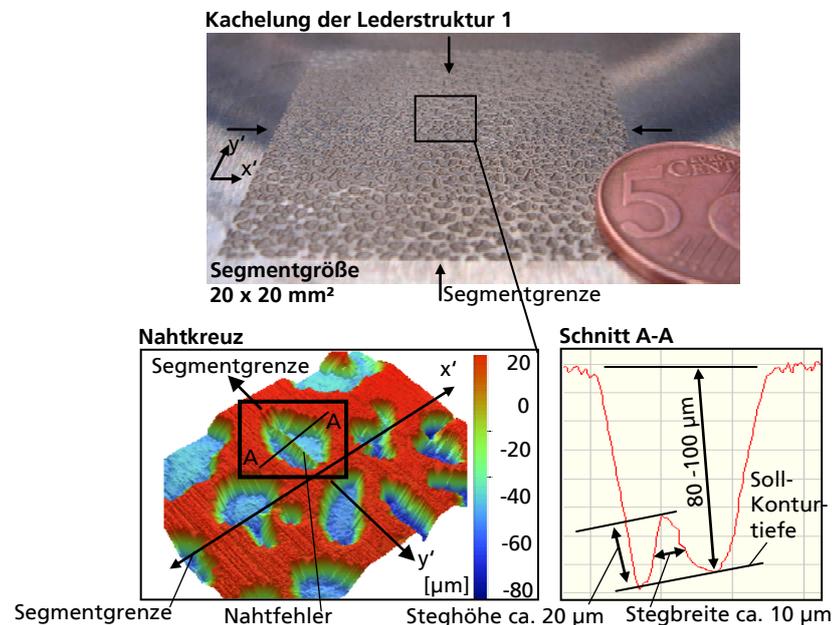


Abb. 70: Kachelungsstrategien mit vieleckiger Segmentform

Bei der Strategie I erfolgt eine sequenzielle Abarbeitung von flächig zusammenhängenden Segmentschichten. Das bedeutet, dass in einem Bearbeitungszyklus die gesamte Oberfläche mit einem z' -konstanten Schichtverbund abgetragen wird. Dadurch soll eine Minimierung der Schmelzaufwürfe an den Nahtstellen der einzelnen Segmente erzielt werden. Die Anzahl der einzelnen Zyklen entspricht dabei der Schichtanzahl. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der Strategie II eine sukzessive, vollständige Bearbeitung aller Schichten im Segment. Die Segmentanzahl bestimmt dabei die Positionierbewegungen der Handhabungsanlage, wodurch die Strategie II im Vergleich zur Strategie I deutlich geringere Nebenzeiten aufweist.

Mit der erarbeiteten Kachelungsstrategie I wurde eine Leder-Teststruktur in eine ebene Oberfläche (Abbildung 71, oben) eingebracht. Dabei wurden jeweils vier Segmente hergestellt.



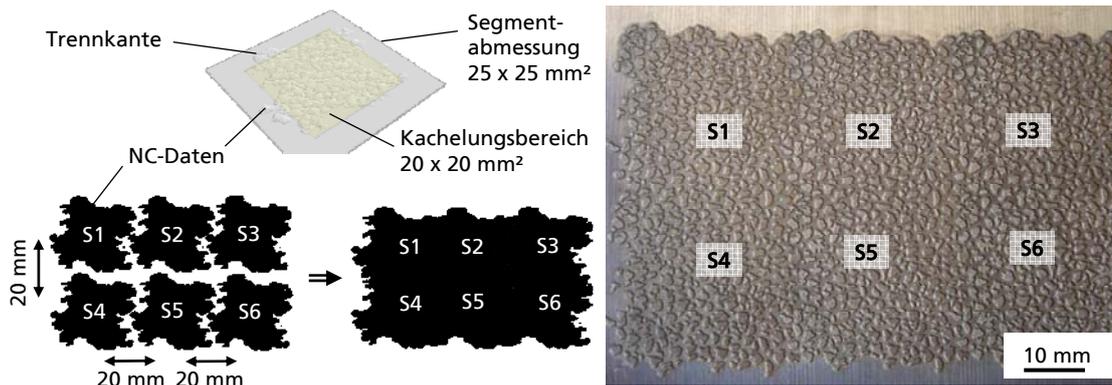
Hauptbearbeitungsparameter; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; 4 quadratische Segmente

Abb. 71: Kachelung von Leder 1 auf ebener Oberfläche durch Kachelungsstrategie I

In der Kachelungszone sind jedoch einige wenige Strukturfehler entlang der x' -Achse festzustellen, die sich als Stege im Abtraggrund mit einer Breite von ca. 10 μm und einer Höhe von ca. 20 μm beschreiben lassen (Abbildung 71, unten). Die Kachelungsfehler treten nicht regelmäßig auf, so dass deren Entstehung mit dynamischen, unvorhersehbaren Positionierfehlern im Scannersystem zu erklären ist. Da jedoch die Kachelungsfehler bei erhöhtem Aufkommen eine sichtbare, nicht tolerierbare Trennlinie bilden können, muss im Hinblick auf andere vernetzte, unregelmäßige Strukturen eine Optimierung der Kachelungsstrategie 1 erfolgen. Dazu werden Segmente mit nichtlinearen, freigeformten Trennkanten erzeugt, die dann jeweils zu einer größeren Fläche verzahnt werden. Die Erzeugung und Aufbereitung dieser Segmente ist sehr aufwändig und erfordert viel Erfahrung im Bereich der Designstrukturerstellung. Geeignete Automatismen stehen nicht zur Verfügung.

Abbildung 72 (links) verdeutlicht anhand der Lederstruktur 2 die Ausführung von nichtlinearen, freigeformten Segmenttrennkanten und deren Multiplikation. Die durch NC-Daten beschriebene Struktur mit freigeformten Segmentkanten weist eine maximale Ausdehnung von 25 x 25 mm² auf. Der relevante Kachelungsbe-
reich befindet sich dabei im Zentrum und besitzt nur eine Abmessung von 20 x 20 mm², so dass durch eine Verzahnung (Zustellung jeweils 20 mm in der x- und y-Achse) eine unregelmäßige Kachelung in der Ebene erfolgt. Es können keine ein-

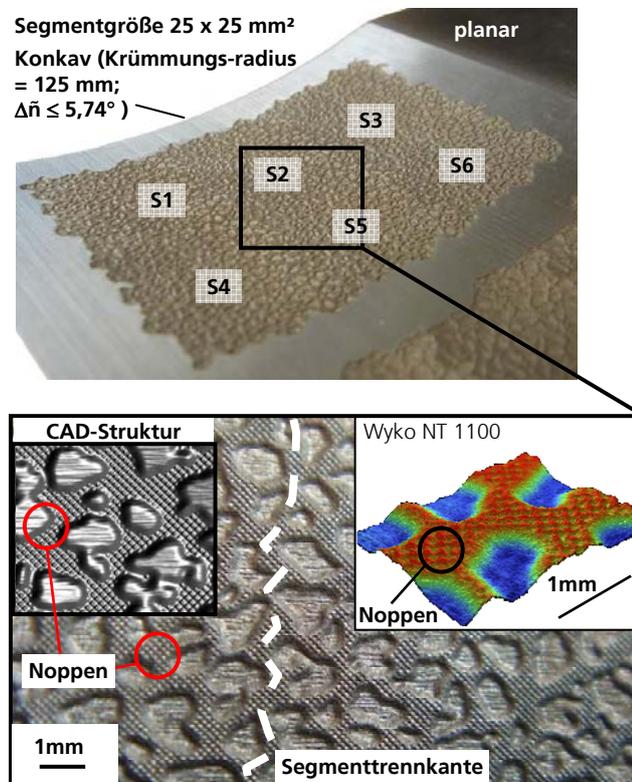
zelen Kachelungsfehler bzw. keine ausgebildete Trennlinie in der Oberflächenstruktur gefunden werden (Abbildung 72, rechts), somit liegt eine nahtlose Kachelung vor.



Hauptbearbeitungsparameter; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie 1; 6 Segmente

Abb. 72: Optimierung der Kachelung durch nichtlineare, freigeformte Segmenttrennkanten

Nachdem die großflächige Kachelung von vernetzten, unregelmäßigen Strukturen auf ebenen Oberflächen möglich ist, wurde eine Übertragung auf gewölbte Oberflächen durchgeführt. Dazu wurden jeweils sechs Segmente einer Lederstruktur mit der Kachelungsstrategie 1 und mit nicht-linearen Segmenttrennkanten in eine konkave Oberfläche (Abbildung 73, Krümmungsradius $r = 125 \text{ mm}$) eingebracht. Aufgrund der vorliegenden Oberflächenwölbung, der Verwendung des z'-Level-Constant-Machinings und des Schichtparameters P3 wurden bei jedem Segment 288 Einzelschichten im CAM-System erzeugt, obwohl die Struktur nur eine Tiefe von $100 \mu\text{m}$ aufweist. Dadurch erhöhte sich der Berechnungsaufwand für ein Segment-Toolpath um etwa 25 %. Da das Abtragsvolumen gegenüber dem einer ebenen Oberflächenbearbeitung konstant blieb, waren die Bearbeitungshauptzeiten unverändert. Das in Abbildung 73 dargestellte Messergebnis der hergestellten Lederstruktur (Wyko NT 1100) verdeutlicht die hohe Abbildungsgenauigkeit der Prozesskette auch bei der Bearbeitung von gewölbten Oberflächen. Strukturfeatures wie die Noppen sind gleichmäßig und fein ausgebildet, auch sind keine Schmelzablagerungen zu erkennen.



Hauptbearbeitungsparameter; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, Oberfläche gefräst mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie 1

Abb. 73: Großflächige Kachelung einer Lederstruktur auf konkaver Oberfläche mit variierten Segmenttrennkantenform; Vermessung mit Wyko NT 1100

7.5.9 Entfernung von Abtragrückständen

Prozessbedingte Abtragrückstände, wie Schmelzablagerungen am Strukturrand oder die weiße Schicht im Abtraggrund, werden durch die eingesetzten Prozessparameter bereits auf ein Minimum reduziert. Nach der Laserbearbeitung weist die Abtragstelle einen rostfarbenen Belag auf, der als kondensierter und in der Luftatmosphäre oxidiertes Niederschlag der Ablationsprodukte identifiziert werden kann (Abbildung 74, links). Die Ausprägung des Belags, vornehmlich Eisen(III)-Oxid, kann durch Absaugen oder durch eine inerte Schutzgasatmosphäre minimiert werden. Die beiden vorgestellten Möglichkeiten erfordern jedoch insbesondere bei großflächigen Bauteilen einen hohen apparativen Aufwand.

In der Literatur bzw. in der industriellen Praxis werden zur Entfernung von Schmelzrückständen und des zuvor beschriebenen Belags verschiedene Methoden beschrieben. Am häufigsten werden dabei die Prozessfolgen Bürsten, Ultra-

schallbad und Pulver-/Kugel-Strahlen oder Ätzen mit Flußsäure (HF) eingesetzt [LORE06], [nach Foba GmbH und Lasertec GmbH], [ENGL06]. Die beschriebene Prozessfolge kann insbesondere bei großflächigen, komplexen Spritzgießwerkzeugen nicht angewendet werden, weil durch Bürsten und Strahlen nicht strukturierte oder zum Teil polierte Oberflächenbereiche beschädigt werden würden. Weiterhin sind Ultraschallbadanlagen für großvolumige Bauteile nicht verfügbar. Das Ätzmittel Flußsäure stellt eine hohe Gesundheitsgefährdung dar und erfordert daher kostenintensive Sicherheits- und Handhabungsmaßnahmen. Von einer Verwendung wird daher Abstand genommen.

Zur Entfernung des Belags wird hier ein Reinigungsschritt mit verdünnter Salzsäure (37,5 %) in Kombination mit einer weichen Bürste eingesetzt. Nach Benetzung der laserbearbeiteten Oberfläche erfolgt ein sofortiger Farbumschlag hin zur metallisch blanken Farbe (Abbildung 74, rechts). Die ablaufende Reaktion kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:



Eine Einwirkzeit der Säure von etwa zwei bis drei Sekunden erzielt bereits konstante Reinigungsergebnisse. Durch leichte Bürstbewegungen kann die Reinigung in Kavitäten beschleunigt werden. Nach der vollständigen Reinigung wird die Oberfläche zunächst mit Wasser und dann mit Ethanol abgespült. Nach einer beschleunigten Trocknung durch einen warmen Luftstrom kann die Oberfläche mit Sprühöl oder anderen Hilfsstoffen gegen Oxidation konserviert werden. Eine negative metallurgische Beeinflussung der Oberfläche durch die verwendete Säure kann nicht festgestellt werden.

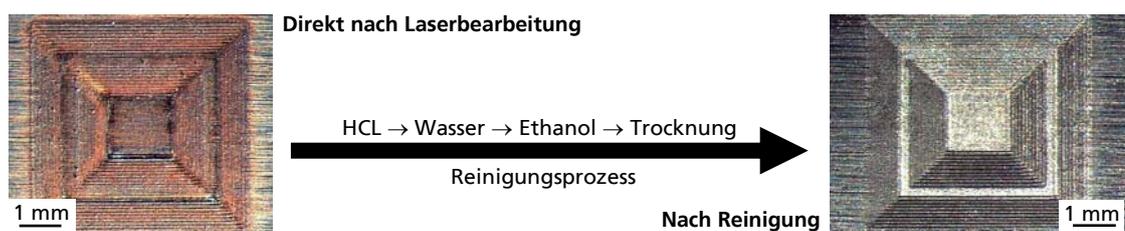


Abb. 74: Oberfläche direkt nach der Laserbearbeitung und nach Reinigung

7.6 Pilotanwendungen und Wirtschaftlichkeit

Anhand von Pilotanwendungen wurde im Rahmen des Projekts die entwickelte Prozesskette auf ihre technologische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit untersucht.

7.6.1 Pilotbauteil 1: Musterplatte mit Lederstruktur

Als Strukturvorlage dient eine natürliche Lederhaut. Zur Digitalisierung wird diese auf eine Vakuumspanplatte aufgezogen, gereinigt und entstaubt, um eine mög-

licht hohe Datenqualität sicherstellen zu können. Mit dem konfokalen Mikroskop (Siscan MC64) wird ein 25 x 25 mm² großer Flächenbereich gemessen. Die Messwerte werden im TIF-Format abgespeichert. Messausreißer und -löcher werden weitestgehend entfernt, indem ein Gaußfilter und ein Datastore (Toleranz 10 Pixel) angewendet werden. Da hier eine größere Fläche als die Strukturvorlage strukturiert werden soll, muss die gemessene und aufbereitete Lederstruktur kachelfähig sein. Da der Aufwand zur Umsetzung der Kachelfähigkeit mit der Datenbasis jedoch sehr hoch ist, wurde diese als Arbeitsvorlage für eine digitale Strukturerstellung genutzt. Anhand der in zuvor dargestellten Methodik wird eine vergleichbare Lederstruktur mit einer Abmessung von 80 x 60 x 0,1 mm³ digital erzeugt. Die Strukturrandbereiche laufen in der Tiefe stufenlos aus und es ist ein Logo nahtlos eingefügt (Abbildung 75, links).

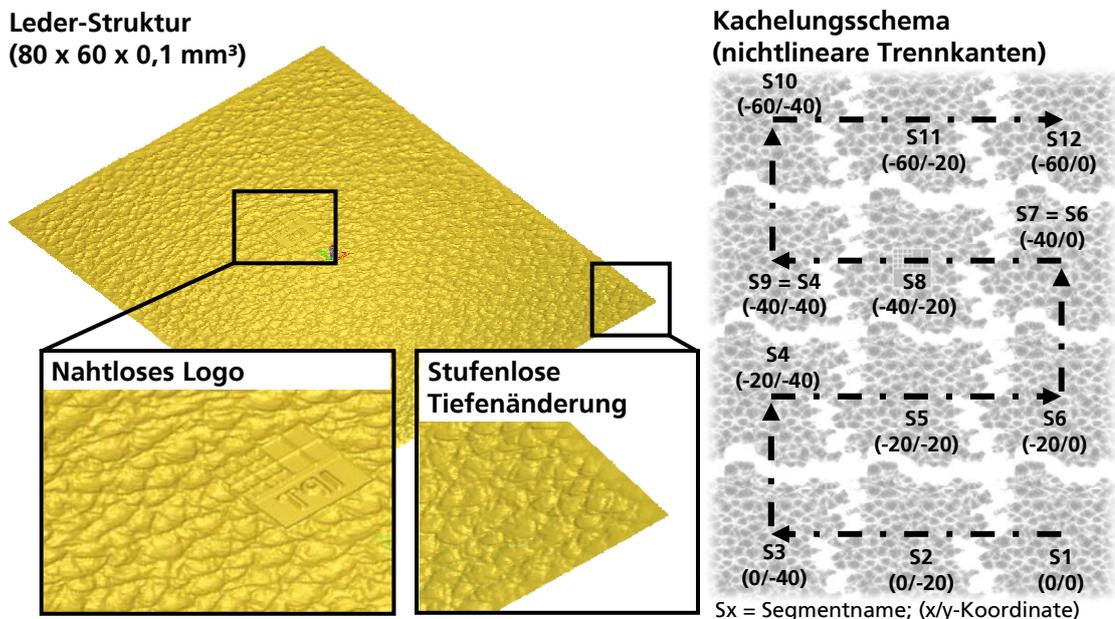
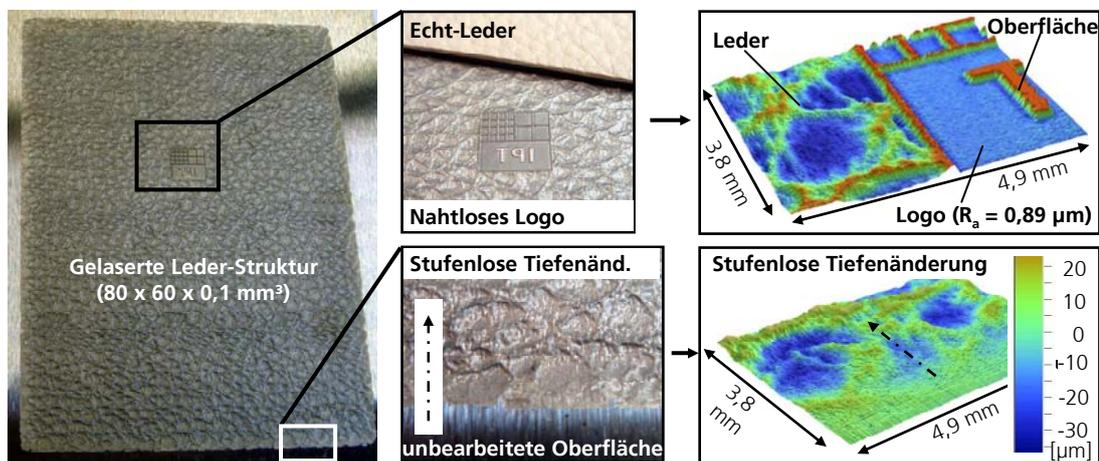


Abb. 75: Durch CAD erstellte Leder-Struktur und Kachelungsschema

Es liegt eine Strukturauflösung in der x'-y'-Ebene von 25 µm und entlang der z-Achse von 0,4 µm vor. Daraus ergibt sich eine Datenmenge von 67,5 MByte. Diese pixelbasierte 2D-Bildvorlage weist keinerlei Messfehler auf. Die Segmentierung erfolgt manuell, wobei aufgrund der Lederstruktur nichtlineare Trennkanten erzeugt werden. Die zwölf einzelnen Segmente weisen entsprechend der maximalen Scannerfeldgröße jeweils eine Abmessung von 25 x 25 mm² auf (Abbildung 75, rechts). Der Verzahnungsgrad der Segmente beträgt 5 mm, so dass die Handhabungsanlage jeweils 20 mm Weglänge zum nächsten Segmentmittelpunkt positionieren muss. Mit ArtCam Pro werden die einzelnen Segmente ins STL-Datenformat (Dreiecksgröße 2 µm) überführt und können somit ins CAM-System zur Erstellung der jeweiligen Segment-Toolpaths eingelesen werden. Die durchschnittliche Datenmenge der Segmente im STL-Format beträgt 24 MByte. Der Global-

Toolpath wird manuell in einem Editor erzeugt, wobei die Kachelungsstrategie 1 angewendet wird.

Im CAM-System (PowerMill) werden die jeweiligen Segment-Toolpaths im z'-Level-Constant-Machining mit dem Schichtparameter P3 und der Stapelstrategie 1 erzeugt. Pro Segment liegen daher 39 Schichten vor. Mit Hilfe des PP werden die verschiedenen ISO-NC-Datensätze erzeugt, die jeweils eine maximale Datenmenge von 1 MByte aufweisen. Abbildung 76 zeigt das großflächig strukturierte Musterplattenwerkzeug nach dem Reinigungsschritt und eine messtechnische Erfassung ausgewählter Strukturdetails. Die einzelnen Zeitaufwände innerhalb der Prozessschritte werden in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angegeben.



Hauptbearbeitungsparameter; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie 1

Abb. 76: Pilotanwendung 1 und Vermessung von Strukturdetails

Sowohl visuell als auch messtechnisch sind keinerlei Nahtstellen in der Struktur festzustellen. Die Abbildungsgenauigkeit kann aufgrund des unregelmäßigen Ledermusters nicht im Bereich der Lederstruktur bestimmt werden, da keine eindeutig vergleichbaren Strukturdetails lokalisiert werden können. Dies kann jedoch innerhalb des Logos erfolgen (Abbildung 77). Anhand eines Soll-/Ist-Vergleichs an einem Buchstaben im Logo kann eine Strukturvergrößerung in der x'-y'-Ebene und entlang der z'-Achse von jeweils 2,3 % festgestellt werden. Diese Abweichungen sind vor allem auf die zahlreichen Berechnungen im 3D-Segment-Prozess zurückzuführen.

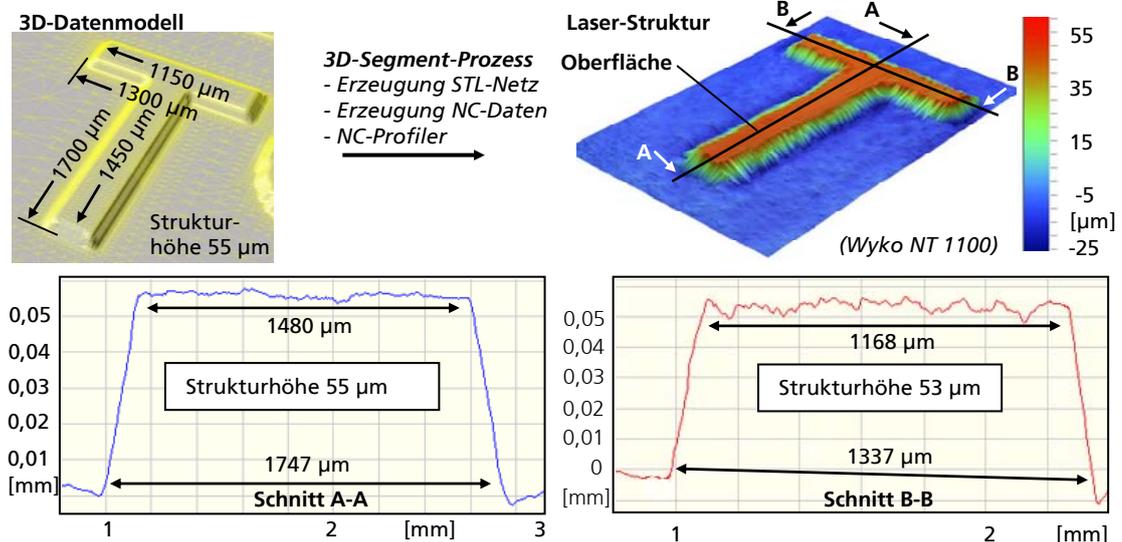


Abb. 77: Pilotanwendung 1: Abbildungsgenauigkeit im Logo-Bereich

7.6.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgt ausführlich anhand der Pilotanwendung 1 – Lederstruktur, weil dort alle Schritte der Prozesskette durchlaufen werden. Eine Übertragung auf die anderen Pilotanwendungen ist somit möglich. Die während der Durchführung der Pilotanwendung ermittelten Durchlaufzeiten sind für eine Übertragung in ein industrielles Umfeld jedoch nur als grobe Anhaltswerte zu betrachten, da durch eine Optimierung von Verfahrensabläufen und der genutzten Systemapplikationen (z. B. leistungsstärkere Workstations und anwendungsspezialisierte Softwareapplikationen) erhebliche Zeiteinsparungen erzielt werden können.

Nachfolgende Annahmen und Definitionen finden bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Verwendung:

- Lineare Abschreibung von Investitionsgütern: Maschinen/Anlagen = 5 Jahre; PC/Software-Systeme = 3 Jahre.
- Der Investitionsaufwand der Laserstrahlstrukturieranlage spiegelt nicht den für eine vergleichbare Serienmaschine wider, dies ist vor allem auf den Prototypenaufbau und auf nicht genutztes Anlagenzubehör zurückzuführen. Der reale Investitionsaufwand wird daher um einen Faktor von 20 % reduziert, um eine repräsentative Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu ermöglichen. Der Investitionsaufwand K_{INV} beläuft sich somit auf 384.000 €.
- Der Zinssatz wird mit 5,5 % kalkuliert.
- Instandhaltungs- und Wartungskosten werden pauschal mit 3 % von K_{INV} angesetzt.
- Einschichtige Arbeitszeit = 1656 h/Jahr, d. h. 8 h/Tag und 17,25 Tage/Monat.



- Dreischichtige Nutzung der Strukturieranlage (automatisierter, mannloser Betrieb), alle anderen Anlagen weisen nur eine einschichtige Auslastung auf.
- Personalstundensätze in Abhängigkeit von der Qualifikation nach BMWi-Sätzen: Ingenieur (FH), Techniker/Meister = 40 € = Q_i ; Facharbeiter = 33 € = Q_f
- Raumbedarf 40 m² für Strukturieranlage, Messanlage (Siscan MC 64) und PC-Arbeitsplätze. Raumkosten pro Jahr 240 €/m² und voll der Strukturieranlage zugeteilt.

Tabelle 5 enthält die Einzelpositionen zu Berechnung des Maschinenstundensatzes der Strukturieranlage bei dreischichtiger Auslastung.

Einzelpositionen	Spezifizierung	Aufwand pro Jahr [€]	Aufwand pro Stunde [€]
Energiekosten	u. a. Strom und Druckluft	9.912	1,99
Instandhaltungskosten	pauschal 3 % von K_{INV}	11.520	2,31
Raumkosten	40 m ²	9.600	1,93
Abschreibung	Linear	76.800	15,40
Zinsen	kalk. Zinssatz = 5,5 %	21.120	4,24
		Summe = 128.952	
Maschinenstundensatz [€/h]			Summe = 25,86

Tab. 5: Maschinenstundensatz der Strukturieranlage im dreischichtigen Betrieb

In der Tabelle 6 sind die jeweiligen Zeitbedarfe, Anlagenaufwände sowie Bedienerqualifikationen und -zeitanteile beim sequenziellen Durchlauf der Prozesskette (Pilotanwendung 1 – Lederstruktur) aufgeführt. Daraus ergibt sich eine Gesamtdurchlaufzeit von 1.130 min (bzw. 18,8 h; ca. ein Arbeitstag) und ein Kostenanteil von 493 €, wobei es sich dabei um eine hoch-qualitative Einzelanfertigung eines Musterplattenwerkzeugs handelt. Es lassen sich daher Fertigungskosten von 0,11 €/mm²-Struktur und ein Zeitanteil von 0,235 min/mm²-Struktur bestimmen, falls die vollständige Entwicklung einer komplexen, unregelmäßigen Struktur erforderlich ist und alle Segmente eine unterschiedliche Gestalt aufweisen. Bei geringeren Anforderungen an die Prozesskette sind erheblich reduzierte Kennwerte zu erwarten.



Arbeitsschritt	Anlagenaufwand pro Stunde [€]	Zeitbedarf der Anlage [min]	Bediener		Kostenanteil [€]
			Qualifikation	Zeitanteil [%]	
Vorbereitung, Messung und Datenexport der Lederprobe	20,80	20	Q _F	100	17,93
Messdatenaufbereitung	1,63	20	Q _F	100	11,54
Strukturerstellung, Segmentierung und STL-Erzeugung	1,63	210	Q _I	100	145,71
NC-Datenerstellung (Global- und Segment-Toolpath)	4,87	360	Q _I	20	77,22
Laserstrahlstrukturieren	25,86	500	Q _F	5	229,25
Nachbearbeitung	1,20	20	Q _F	100	11,4
Summe:		1.130			493,05

Tab. 6: Zeit- und Kostenanteil beim sequenziellen Durchlauf der Prozesskette

Mit dem konventionellen Ätzen beträgt nach Angaben der industriellen Anbieter die Herstellungszeit einer Musterplatte mit einer vergleichbaren Lederstruktur inklusive Strukturerstellung etwa fünf Tage bei einschichtigem Betrieb. Der Kostenaufwand wird dabei mit ca. 1.600 € angegeben [ÄTZ07]. Dabei ist außerdem zu beachten, dass aufgrund der nicht durchgängigen Datenkette und der begrenzten Strukturflexibilität erhebliche Einschränkungen bei der Strukturabbildung und beim umsetzbaren Strukturdesign vorliegen. Bei der betrachteten Pilotanwendung 1 – Lederstruktur werden mit der hier entwickelten Prozesskette somit ein Zeitvorteil von 80 % und ein Kostenvorteil von 70 % gegenüber der konventionellen Ätzbearbeitung bei gleichzeitig höherer Flexibilität und Abbildungsqualität erzielt. Insbesondere bei hochkomplexen Bauteiloberflächen und aufwändigen Strukturdesigns führen diese Vorteile zu erheblichen Einsparpotenzialen innerhalb der Werkzeugfertigung.

Bei einer regelmäßigen Multiplikation (Kachelungsstrategie 1) eines bereits vorhandenen STL-Segments der Strukturklassen II und IV liegen erheblich kürzere Prozesskettendurchlaufzeiten und -kosten vor, da die Strukturerstellung entfällt und nur ein Segment-Toolpath für die gesamte Bearbeitung benötigt wird. Die NC-Datenerstellung eines Segments mit der Abmessung 20 x 20 x 0,1 mm³ beläuft sich auf etwa 30 Minuten (Schichtparameter P3). Die Einrichtzeit der Strukturiermaschine und die Reinigung kann jeweils mit 20 Minuten festgelegt werden. Die Bearbeitungszeit eines Segments beträgt jeweils etwa 30 Minuten. Es lässt sich daher ein Kostenanteil von 0,04 €/mm²-Struktur und ein Zeitanteil von 0,092 min/mm²-Struktur festlegen.

7.6.3 Pilotbauteil 2: Musterplatte mit synthetischer Struktur

Bei Pilotbauteil 2 handelt es sich ebenfalls um ein ebenes Musterplattenwerkzeug (1.2767). In dieses wird eine synthetische Struktur mit einer Abmessung von 80 x

60 x 0,1 mm³ eingebracht. Die synthetische Struktur wird direkt im CAD-System als pixelbasierte 2D-Bildvorlage erstellt. Die Struktur weist mehrere Gestaltelemente auf, um die Strukturflexibilität der Prozesskette zu demonstrieren: stufenlose Strukturänderung im Randbereich (partielle Entformbarkeit), nahtloser Designwechsel innerhalb der Struktur (Morphing) und die Darstellung eines Logos. Das digitale Modell der Struktur zeigt Abbildung 79, wobei die gleiche Außenabmessung und Auflösung wie bei der zuvor betrachteten Leder-Struktur vorliegt. Die Segmentierung erfolgt manuell. Aufgrund der vorliegenden Strukturform werden quadratische Segmente mit einer Abmessung von jeweils 20 x 20 mm² erzeugt. Der Global-Toolpath wird manuell in einem Editor erstellt, wobei die Kachelungsstrategie 2 (Segment-Komplettbearbeitung) angewendet wird. Die Überführung der einzelnen Segmente ins STL-Datenformat (Dreiecksgröße 2 µm) erfolgt mit ArtCam Pro.

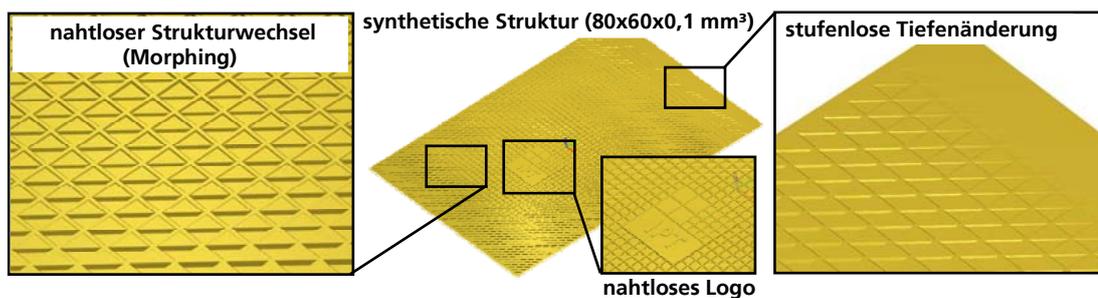


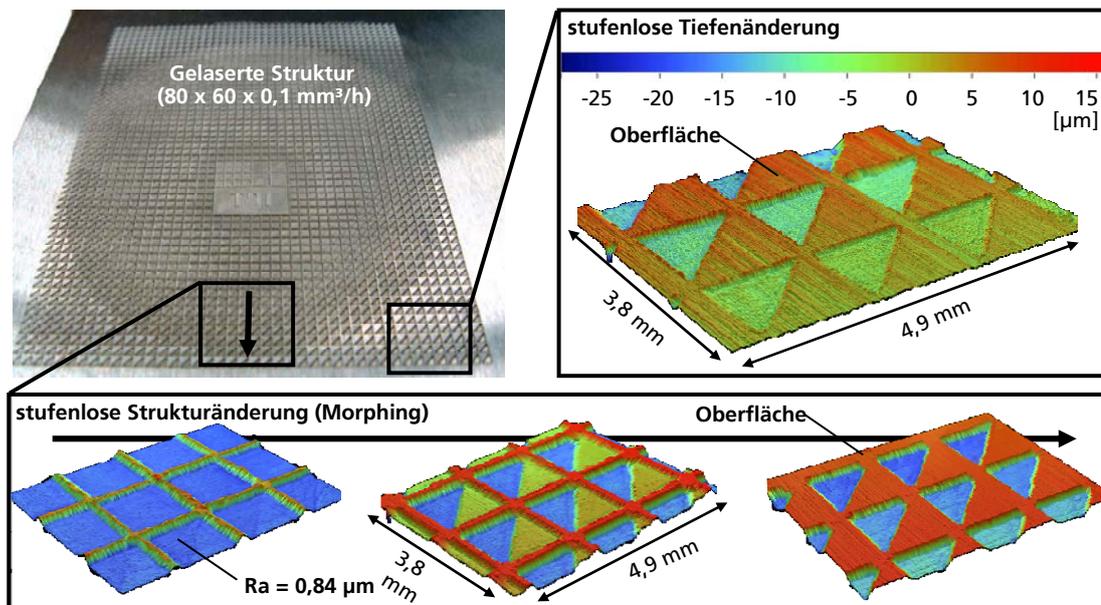
Abb. 79: Im CAD erstellte synthetische Struktur mit Strukturfeatures

Im CAM-System werden die jeweiligen Segment-Toolpaths im z'-Level-Constant-Machining mit dem Hauptbearbeitungsparameter, dem Schichtparameter P3 (Schichtdicke 2,5 µm) und der Stapelstrategie 1 erzeugt. Pro Segment liegen somit 39 Schichten vor, die in einem Toolpath zusammengefasst werden. Die Überführung in einzelne ISO-NC-Datensätze erfolgt im PP, wobei Datenmengen bis zu 26 MByte auftreten. Da der NC-Profilier in der vorliegenden Entwicklungsstufe jedoch nur Datengrößen bis zu 25 MByte sicher verarbeiten kann, müssen einige Segment-Toolpaths aufgeteilt werden. Abbildung 80 zeigt zum einen das großflächig strukturierte Musterplattenwerkzeug nach dem Reinigungsschritt und zum anderen eine messtechnische Erfassung ausgewählter Strukturdetails. Dabei wird ersichtlich, dass sowohl die Strukturänderung (Morphing) als auch der Strukturauslauf im Randbereich umgesetzt wurde.

Es sind keine Nahtstellen in der Struktur feststellbar. Anhand von Soll-/Ist-Vergleichen an verschiedenen Strukturdetails wird die Abbildungsgenauigkeit bestimmt (Wyko NT 1100). Im Mittel besteht eine Formabweichung von +2,2 % in der x'-y'-Ebene sowie entlang der z'-Achse. Die Rauheit Ra im Abtraggrund beträgt im Mittel 0,84 µm.

Die Durchlaufzeit der Prozesskette bei der Pilotanwendung 2 ist gegenüber der Pilotanwendung 1 um 1,5 h verringert, da aufgrund der Designstruktur ein gerin-

geres Abtragsvolumen vorliegt. Die Kosten im Prozessschritt Strukturierung reduzieren sich daher entsprechend.

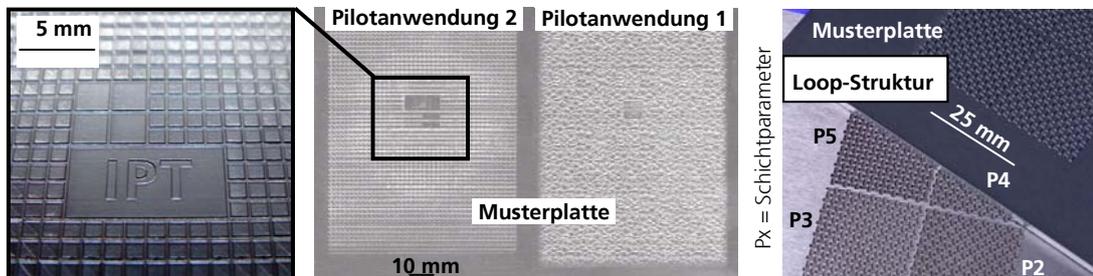


Hauptbearbeitungsparameter; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche geschliffen mit $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; Schichtparameter P3; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie 1

Abb. 80: Pilotanwendung 2: Vermessung von Strukturdetails

7.6.4 Abmusterung von Teststrukturen

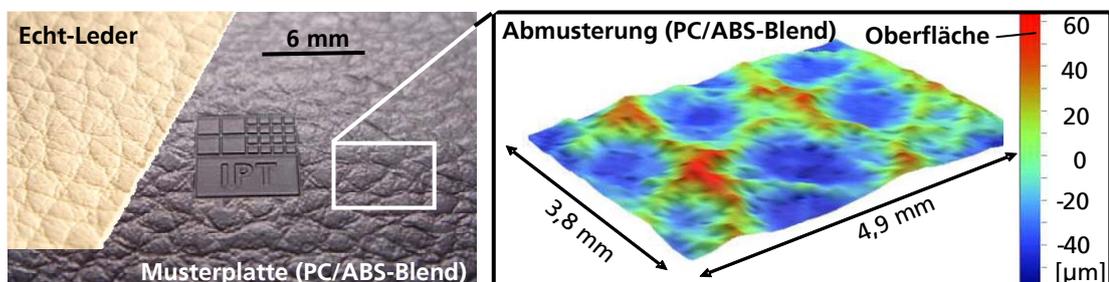
Die Leistungsfähigkeit des 3D-Segment-Prozesses zur großflächigen Herstellung abformbarer Strukturen in Werkzeugen konnte bereits innerhalb der Pilotbauteilbearbeitung gezeigt werden. Anhand von Abmusterungen der Pilotanwendungen und der Loop-Struktur konnte die Abformungsqualität von laserstrahlstrukturierten Oberflächen bestimmt werden. Bei der Loop-Struktur wurde der Schichtparameter P_x variiert, um die Ausbildung des Treppenstufeneffekts untersuchen zu können. Abbildung 81 zeigt die abgeformten Kunststoffplatten.



Hauptbearbeitungsparameter; $T_0 = 23^\circ\text{C}$; 1.2767, ebene Oberfläche $R_a = 0,45 \mu\text{m}$; z'-Level-Constant-Machining; Stapelstrategie 1; Kachelungsstrategie 1; Einspritzzeit = 2 s; Werkzeugtemp. = $63,5^\circ\text{C}$; Massentemp. = 240°C

Abb. 81: Abmusterung der Pilotanwendungen 1/2 sowie der Loop-Struktur in PC/ABS-Blend

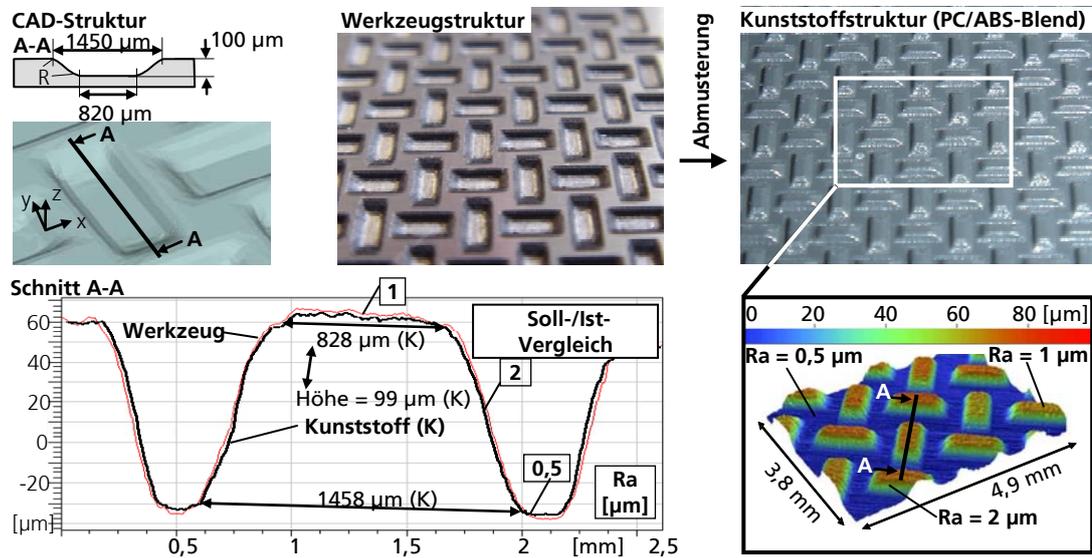
Aufgrund des unregelmäßigen Strukturcharakters der Pilotanwendung 1 (Leder 2) kann kein gesicherter Soll-/Ist-Vergleich zur Überprüfung der Abformgenauigkeit durchgeführt werden. Die Begutachtung erfolgt daher rein visuell (Abbildung 82). Bei einer Einspritzzeit von 2 s sind keinerlei Strukturfehler, wie Lufthaken oder Entformungsbeschädigungen, zu erkennen. Weiterhin sind keine Segmentnahtstellen feststellbar. Die Ausprägung der Struktur in Form und Glanz entspricht der von konventionell hergestellten Strukturen.



Werkzeugtemperatur = $63,5^\circ\text{C}$; Massentemperatur = 240°C , Einspritzzeit = 2 s

Abb. 82: Abmusterung der Pilotanwendungen 1/2 sowie der Loop-Struktur in PC/ABS-Blend

Bei Strukturen mit einem regelmäßigen Formcharakter (Pilotanwendung 2 und Loop-Struktur) können grundsätzlich Soll-/Ist-Vergleiche zur Überprüfung der Abformgenauigkeit durchgeführt werden. Dabei ist neben der Strukturabbildung die Oberflächenrauheit R_a von großem Interesse (Glanzgrad). Mit den verfügbaren Messmitteln (Wyko NT 1100, SiScan MC64) liegt jedoch bei der Pilotanwendung 2 eine unzureichende Messdatenqualität vor, welche durch die steilen Flankenwinkeln begründet ist. Diese Problematik ist bei der Loop-Struktur nicht gegeben, so dass dort ein gesicherter Soll-/Ist-Datenvergleich erfolgen kann (Abbildung 83).



Werkzeugtemperatur = 63,5 °C; Massentemperatur = 240 °C, Einspritzzeit = 2 s

Abb. 83: Abmusterung der Loop-Struktur in PC/ABS-Blend und Soll-/Ist-Vergleich

Die bei der Kunststoffstruktur gemessenen Oberflächenrauheiten R_a decken sich mit denen im Werkzeug. Es sind keinerlei Strukturbeschädigungen durch die Entformung zu erkennen. Im Flankenbereich sind keine Abhängigkeiten des gewählten Schichtparameters auf die Ausbildung des Treppenstufeneffekts erkennbar. Die Kunststoffstruktur weist gegenüber der Werkzeugstruktur eine geringfügig verkleinerte Form auf. Diese Abweichung kann dabei mit kleiner als 1 % angegeben werden und kann auf die Schwindung des Kunststoffs zurückgeführt werden. Aus dem Vergleich von Kunststoffstruktur zur CAD-Struktur lässt sich somit eine umfassende Formgenauigkeit für den 3D-Segment-Prozess bestimmen, diese kann mit einer Strukturvergrößerung von 1 % im Mittel angegeben werden. Die Schwindung des Kunststoffs kompensiert dabei zum Teil die Strukturvergrößerung durch den 3D-Segment-Prozess.



8 Öffentlichkeitsarbeit

Im Rahmen der Euromold Messe 2005 und 2007 (Frankfurt) wurden das Projekt und dessen Teilergebnisse der Öffentlichkeit präsentiert. Dabei wurden diverse Exponate (strukturierte Werkzeugeinsätze) und Projektinformationen in Form von Flyer gezeigt und verteilt. Die Betreuung der Exponate erfolgte durch Mitarbeiter des Fraunhofer IPT, so dass in Fachgespräche die Thematik der Freiformoberflächen mittels Laserstrahlstrukturierung offen diskutiert werden konnte.

Durch zahlreiche Fachvorträge wurden das Projekt und die bis dato erzielten Teilergebnisse laufend einem ausgewählten Publikum (meist Werkzeugbau) präsentiert (Initiative Werkzeugbau, aachener werkzeug- und formenbau, AWK-Kolloquium, aachener Werkzeugbau Akademie, AWF-Kolloquium).

Das Projekt »FlexOStruk« war Gegenstand des Zentralexponats des Messeauftritts des Fraunhofer IPT auf der Lasermesse 2007-World of Photonics (18.-21. Juni 2007) und wurde entsprechend im Vorfeld mit Pressemitteilungen beworben. Der nationale und internationale Besucherzulauf und das damit verbundene Interesse auf der Messe -insbesondere aus der Werkzeugbaubranche- übertraf bei weitem die Erwartungen. Parallel wurden Projekt und Thema auf dem Photonics Forum der Messe im Rahmen einer Präsentation unter dem Titel »Prozesskette und Fertigungszelle zur konturnahen und großflächigen Oberflächenstrukturierung mittels Laser« dem Messepublikum vorgestellt.

Auch auf den Technology Days der Firma Mikron (Nidau/CH) wurde das Projekt thematisiert und einem internationalen Publikum präsentiert. Ergebnis dieser Projektvorstellungen war die Vereinbarung einer langfristigen Kooperation zwischen Mikron und dem Fraunhofer IPT.

Anhand von Postern wurden die Inhalte des Projekts am Maschinendemonstrator verdeutlicht, so dass bei den zahlreichen Hallenbesichtigungen die Thematik dem Publikum erläutert wurde.

Auf einem eigens veranstalteten Industrieworkshop am 29. März 2007 mit über 20 Teilnehmern aus Industrie und Forschung wurden die erzielten Projektergebnisse einem breiteren Publikum vorgestellt.

Neben der Erwähnung des Projektes auf der Internetseite des Fraunhofer IPT wird »FlexoStruk« explizit auf der Internetseite www.strukturkatalog.de vorgestellt.

9 Zusammenfassung

Es wurde erfolgreich eine ganzheitliche, auf konturnahem 3D-Laserstrahlstrukturieren basierende Prozesskette zur flexiblen, großflächigen und abbildungsgenauen Herstellung von komplexen Strukturen in ebenen und gewölbten Oberflächen entwickelt und in Form eines funktionstüchtigen Maschinendemonstrators umgesetzt. Durch die realisierte durchgängige Datenkette liegt eine geringe Fehlerfortpflanzung vor. Eine hohe Anwenderfreundlichkeit wird durch eine zentrale Technologiedatenbank und durch unterstützende Softwareapplikationen sichergestellt. Anhand unterschiedlicher Pilotanwendungen aus den Bereichen Werkzeug- und Formenbau konnte sowohl die technologische als auch die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Prozesskette eindeutig aufgezeigt werden. Die Prozesskette ermöglicht es, schnell – eventuell über Nacht – ein reales Muster einer neu entwickelten Designstruktur für optische und haptische Beurteilungen in den Händen zu halten. Durch ihre hohe Flexibilität ist die Umsetzung bisher nicht realisierbarer Designs und Oberflächenmerkmale möglich. Grundsätzlich ist die Prozesskette zur Bearbeitung großflächiger Bauteile wie z. B. automobile Instrumententafelwerkzeuge einsetzbar. Die hier erarbeiteten Erkenntnisse können auch auf andere Urformverfahren, wie z. B. Vakuumguss oder Slush-Moulding, übertragen werden, weil stets strukturierte Werkzeuge benötigt werden.

Als Maschinendemonstrator wurde eine bestehende 5-Achs-Fräsmaschine mit einem aus 3-Achs-Scanner und Laserstrahlquelle bestehenden Lasermodul modular erweitert. Durch ein spezielles Profibus-System und eine NC-Befehlerweiterung wurde eine steuerungstechnische Verknüpfung aller Systemkomponenten realisiert. Bei der Inbetriebnahme wurde eine Justage des Strahlengangs und eine Leistungs-Zeit-bezogene Untersuchung aller Betriebsparameter vorgenommen. Durch eine Anpassung der Kompensationstabellen konnte eine Halbierung der werkseitigen Positionierungsgenauigkeiten der translatorischen Handhabungsachsen erzielt und damit die Maschine optimal an die neuen Bedingungen angepasst werden.

Die Prozesskette nutzt als Kernstrategie den hier entwickelten 3D-Segment-Prozess, der auf einer neuartigen sequenziellen und synchronisierten Abarbeitung einzelner Segmentfelder basiert. Der 3D-Segment-Prozess ermöglicht es, die bestehenden technologischen Restriktionen bei der laserstrahlbasierten Oberflächenstrukturierung aufzuheben. Dazu zählen bis dato insbesondere die stark limitierte Datenmenge, die ausschließlich ebene Bearbeitung von Bauteilen mit kleinen Abmessungen sowie die mangelnde Umsetzung komplexer 3D-Strukturen.

Zur Strukturentwicklung wurden zwei Vorgehensweisen erarbeitet: Messtechnisch aufgenommene Referenzstrukturen und digitale Erstellung im CAD. Insbesondere das konfokale Mikroskop Siscan MC64 eignet sich aufgrund seiner hohen Datenqualität und Datenaufnahmegeschwindigkeit und des großen Messbereichs zur Datenakquisition. Es wurden geeignete Arbeitsfolgen zur Datenaufbereitung und -weiterverarbeitung entwickelt. Die direkte Strukturerstellung im CAD weist eine



nahezu uneingeschränkte Strukturfreiheit auf, welche jedoch viel Erfahrung beim Anwender voraussetzt. Im Vergleich zu gemessenen Strukturen besitzen CAD-Strukturen geringere Datenmengen und eine höhere Datenqualität auf. Außerdem ermöglicht CAD eine bauteilangepasste Strukturentwicklung und eine Berücksichtigung technologischer Randbedingungen – Laserstrahlstrukturieren und Abmusterungsverfahren.

Für die Strukturmultiplikation wurde ein einheitlicher Algorithmus zur Erzeugung der Kachelfähigkeit von Struktursegmenten weiterentwickelt – die Quadranten-Austausch-Methode. Zur digitalen Strukturübertragung auf Oberflächen wird das nahezu verzerrungsfreie Displacement Mapping mittels u/v-Height-Maps eingesetzt. Für die Segmentierung der strukturierten Oberfläche wurde eine allgemeingültige Vorschrift erarbeitet, welche die Randbedingungen sowohl des Lasermoduls als auch der Prozesstechnologie berücksichtigt. Für deren automatisierte Anwendung wurde ein Splitter-Modul-Konzept entwickelt. Die ISO-NC-Datengenerierung des Global- und des Segment-Toolpaths kann mit Hilfe von bestehenden CAM-Funktionalitäten durchgeführt werden. Das speziell entwickelte Scanner-Back-End überführt die Kommandos des Segment-Toolpaths in für das Lasermodul verständliche Befehle, steuert zudem das Lasermodul und kommuniziert mit der CNC/SPS zur Sicherstellung des 3D-Segment-Prozesses.

Die wesentlichen Ergebnisse der prozesstechnologischen Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren sind zum einen die definierten, greifbaren Laserparametersätze in Form von Laser-Tools in der zentralen Prozess- und Technologiedatenbank zur Entlastung des Anwenders und zum anderen die Entwicklung umfassender Bearbeitungsstrategien zur nahtlosen, großflächigen und abbildungstreuen Bearbeitung ebener und gewölbter Oberflächen.

Innerhalb der theoretischen Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren konnte ein modellhafter Zusammenhang zwischen der Abtragqualität/-quantität und der Strahlintensität aufgestellt werden. Das optimale Prozessfenster – höchste Abtragleistung bei geringsten Schmelzablagerungen und kleinster WEZ – befindet sich oberhalb der Reflexions- und unterhalb der Plasmaabschirmschwellintensität. Anhand von umfangreichen Versuchen mit Einzelpulsen, Abtraggräben und Abtragquadern konnte dementsprechend ein optimaler Hauptbearbeitungsparameter ($f_p = 40 \text{ kHz}$, $I_A = 30 \text{ A}$, $I_{M,Laser} = 4,3 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$) definiert werden. Auf dieser Basis wurden zur Herstellung mehrschichtiger Abträge spezielle Schichtparameterkombinationen (Px) aus dem Pulsüberlapp S (25-50 %) und dem Hatch/Bahnabstand H (25-62,5 %) gebildet, welche in Verbindung mit der Zick-Zack-Strategie und der Stapelstrategie 1 (Bahnorientierung 90° wechselnd) die geringsten Oberflächenrauheiten und Schmelzkranzhöhen, die höchsten Abtragraten sowie konstante Schichtdicken aufweisen. Der Schichtparameter P3 (Schichttiefe $s = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$; Abtragsvolumenrate $V_{Abtrag} = 0,572 \text{ mm}^3/\text{min}$ und Rauheit R_a im Abtraggrund $0,61 \text{ }\mu\text{m}$) stellt das Parameteroptimum dar, u. a. weil dieser die geringste Ausbildung des Treppenstufeneffekts aufweist. Eine oberflächennahe Aufhärtung des Grundgefüges ist nicht feststellbar, es liegt lediglich eine weiße

Schicht – Martensit/Zementit – mit einer Dicke zwischen 2,4-5,8 μm vor (bei P3 minimal). Der auf der Oberfläche niedergeschlagene Abtragrückstand – Eisen(III)-Oxid – kann durch eine HCL-Lösung strukturschonend entfernt werden.

Die maximale herstellbare Strukturauflösung bzw. minimale Abbildungslänge von NC-Bahnen beträgt 100 μm . Innerhalb eines Segments können gewölbte Flächen mit einem Krümmungsradius $r_{\text{min,real}}$ von bis zu 60 mm reproduzierbar und mit hoher Qualität bearbeitet werden. Zur Segmentfeldkachelung wurden spezielle Strategien entwickelt, die Strategieauswahl erfolgt in Abhängigkeit der vorliegenden Oberflächen- und Strukturform. Grundsätzlich liegt bei Verwendung der Kachelungsstrategie I – Schicht-Komplettbearbeitung – und von nichtlinearen, freigeformten Segmenträndern die geringste Anzahl und Ausprägung von Nahtfehlern vor, die zum größten Teil nicht mehr messtechnisch lokalisiert werden können. Die gelaserten Strukturen weisen eine mittlere Formabweichung von +2,2 % gegenüber dem CAD-Modell auf. Die in Kunststoff abgeformten Strukturen verfügen über eine hohe Qualität und zeichnen sich durch eine reduzierte Formabweichung von nur +1 % aus (Schwindung). Je nach Strukturdatenbasis – Referenzoberfläche oder CAD-Datenmodell – liegt ein Kostenanteil von 0,04 bis 0,11 €/mm²-Struktur und ein Zeitanteil von 0,092 bis 0,325 min/mm²-Struktur vor. Dies führt zu einem Zeitvorteil von bis zu 80 % und einem Kostenvorteil von bis zu 70 % gegenüber der konventionellen Ätzbearbeitung bei gleichzeitig höherer Flexibilität und Abbildungsqualität.

Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit und der industriellen Akzeptanz sowie die Ausweitung des Anwendungsbereichs der hier entwickelten Prozesskette erfordern vielfältige Anschlussarbeiten in unterschiedlichen Teilbereichen. Dazu zählt die Neuentwicklung eines speziellen CAM-Systems, welche die Berechnungszeiten von NC-Bahnen deutlich reduziert und neue, spezialisierte Funktionalitäten (z. B. Constant-to-Contour-Machining) aufweist. Weiterhin wird eine softwareunterstützte Segmentierung mit Anbindung ans CAM-System benötigt. Die Erschließung neuer Anwendungsfelder erfordert die Ausweitung der Technologiedatenbank hinsichtlich zusätzlicher Werkstoffe und anderer Laserstrahlquellen, wie den fs-/ps-Laser. Durch eine Optimierung von Verfahrensabläufen, durch eine Nutzung von Lasern mit höheren Pulswiederholraten und durch den Aufbau einer serientauglichen, hinsichtlich des 3D-Segment-Prozesses vollständig neu aufgebauten Maschine sind weitere Zeit- und Kosteneinsparungen möglich. Insbesondere in der Scannertechnologie bestehen große Entwicklungspotenziale.



10 Literatur

- [EVER98] Eversheim, W.; Klocke, F.: Werkzeugbau mit Zukunft: Strategie und Technologie. X. Aufl. Heidelberg: Springer Verlag, 1998, S. 2
- [GROS04] Grosse, P.: Laser Rapid Manufacturing für die Mobilfunktelefonproduktion. In: Konferenz Laserforum Nortec 2004. Hamburg, 10. Fachmesse für Produktionstechnik, 23. Januar 2004. Hamburg: Hamburg Messe und Congress GmbH
- [SANC06] Sánchez, J. A.: Oberflächenintegrität bei mit Drahterosion geschnittenen Werkstücken. In: EDMWORLD. 2006, S. 10-11
- [WEIK06] Weikert, M.: Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen. Dissertation Universität Stuttgart. 2006, S. 74
- [LORE06] Lorenz, A.: Untersuchungen zur Prozessfähigkeit von kurzpuls-Laser-Systemen. In: Laser-Sommerschule 2006, Veranstalter: Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik WLT. Dresden, 28.-30.06.2006, S. 5
- [ENGL06] Engel, A.; Weißmantel, S.; Reiß, G.: 3D - Lasermikrostrukturierung mit Femtosekundenlaserstrahlung. In: Laser Magazin. Magazin Verlag Hightech Publications KG, Bad Nenndorf. Ausgabe 5/2006, S. 28
- [ÄTZ07] N. N.: Angaben der Unternehmen: J. & F. Krüth Form-Ätz-Technik, Solingen; Reichle CNC-Graviertechnik, Bissingen/Teck; Eschmann-Textures, Gummersbach und Neustadt; Standex International GmbH, Krefeld; Ho-henloher Formstruktur, Pfedelbach. 2007
- [OHLI01] Ohlinger, R.: Oberflächengestaltung mit Tiefziehfolien und Slushhäuten unter Berücksichtigung neuer Qualitäts- und Funktionsanforderungen. In: Tagungsband „Oberflächen im Fahrzeugbau, Innenausstattung und Karosserie“. Veranstalter: IIR Deutschland GmbH. Frankfurt am Main, 19.-20.06.2001
- [KRÜT05] Krüth, S.: Beeindruckende Strukturen. In: Plastverarbeiter, Ausgabe 10/2005, S. 40f.
- [NOIS02] Noisternig, J.: Oberflächentrends aus Sicht eines Zulieferers. In: Tagungsband „Oberflächen in der Fahrzeuginnenausstattung“. Veranstalter: IIR Deutschland GmbH. Köln, 24.-25.06.2002, S. 1-37
- [SIEL03] Sielaff, S.: Vom Entwurf zur Serie. In: Tagungsband „Der Automobil-Innenraum – Design als Wettbewerbsfaktor“. Veranstalter: Euroform, München. München, 9.-10.12.2003, S. 1-10
- [KERK02] Kerkhoff, D.: Oberflächengestaltung – Zielkonflikt zwischen Endkonsument und Spezifikation. In: Tagungsband „Oberflächen in der Fahrzeuginnenausstattung“. Köln, 24.-25.06.2002, S. 1-27



- [KÖNI05] König, R.: Strukturbildung auf verschiedensten Grundmaterialien durch ein neues Lackierverfahren. In: Tagungsband „Hochwertige Werkstoffe für den Fahrzeuginnenraum“. Veranstalter: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum – SKZ. Würzburg, 29.-30.06.2005, S. 1-5
- [NEBE01] Nebelung, G.: Techniken in der Oberflächengestaltung. In: Tagungsband „Oberflächen im Fahrzeugbau, Innenausstattung und Karosserie“. Veranstalter: IIR Deutschland GmbH. Frankfurt am Main, 19.-20.06.2001
- [WIED79] Wiederoder, H.-W.: Fotoätzen: Anwendungsbereiche, Voraussetzungen, Grenzen, Stahlwahl, Reparaturen. In: Kunststoffe-Plastics, Band 3 (1979), S. 16-19
- [MITZ04] Mitzler, J.; Bauer, G.; Emig, J.; et al.: Hochwertige Premiumoberfläche aus Spritzgieß- und Reaktionstechnik, In: Kunststoffe. Ausgabe 10/2004, S. 180-186
- [SCHA94] Schauf, D.: Die strukturierende Formnestoberfläche und deren Abformung durch Thermoplaste. In: KU-Marketing. Technische Redaktion: Bayer, Geschäftsbereich Kunststoffe, Anwendungstechnische Information ATI 584, 04.05.1994, S. 1-15
- [WIED95] Wiederoder, H.-W.: Fotochemisches Ätzen von formgebenden Werkzeugen, in: Der Stahlformbauer, Band 12, Heft 4 (1995), S. 4-12
- [WEHA] Wehage, O.; Finke, C.: Metallisch wirkende Oberflächen – ein Trend im Kfz-Interieur. In: Tagungsband „Oberflächen in der Fahrzeuginnenausstattung“. Veranstalter: IIR Deutschland GmbH. Köln, 24.-25.06.2002, S. 1-29