



Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie

Aktuelles aus Wissenschaft und Anwendung

Rückblick auf die 60. Sitzung

Zu seinem 30. Jubiläum ist der AWT am 11.10.21 bei der Hammelmann GmbH in Oelde erstmals wieder seit Beginn der Corona-Pandemie zusammengekommen. Präsentiert wurden aktuelle Entwicklungen aus Wissenschaft und Anwendung.

ab Seite 5

Grußwort zum AWT Jubiläum

Anfang der 90er Jahre entstand der AWT, um den brancheninternen Austausch und die Entwicklung der Wasserstrahltechnologie zu fördern. Prof. Dr.-Ing. Hartmut Louis blickt auf die Gründung des AWT im Jahre 1991 zurück.

ab Seite 6

Fachbeiträge

Auf 48 Seiten diskutieren Autoren aus Forschungsstellen und Wirtschaftsunternehmen aktuelle Entwicklungen aus der Wissenschaft und aus der industriellen Anwendung.

ab Seite 8

Leibniz Universität Hannover
Institut für Werkstoffkunde

Unterwassertechnikum Hannover
Wasserstrahllabor Hannover
Lise-Meitner-Straße 1
30823 Garbsen

ISBN 978-3-95900-590-6
<https://doi.org/10.15488/11464>

Kontakt:
wlh@iw.uni-hannover.de
+49 (0) 511 762 9824

Editorial

Liebe Leserinnen und Leser, liebe Mitglieder des AWT,

seit 1991 existiert nun der an der Leibniz Universität Hannover (damals TH Hannover) ins Leben gerufene Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie. Seit der Gründung finden zweimal jährlich Sitzungen zur Förderung der Wasserstrahltechnologie statt. Jeweils im Frühjahr an der Leibniz Universität im Hannover sowie im Herbst bei einem Mitgliedsunternehmen aus dem Arbeitskreis. Der AWT kann nun also auf 60 Sitzungen und damit eine 30-jährige Historie zurückblicken.

Was den AWT ausmacht, das sind der Austausch zu aktuellen Themen der Wasserstrahltechnologie sowie der persönliche Kontakte innerhalb der Branche. Besonders hervorzuheben sind die freien Gespräche auf persönlicher Ebene zwischen direkten Konkurrenten und Marktbegleitern. Der kollegiale Umgang trägt maßgeblich dazu bei, dass die Veranstaltungen auch aus organisatorischer Sicht zweimal im Jahr eine sehr angenehme Abwechslung zum regulären Arbeitsalltag dargestellt haben und auch in Zukunft darstellen werden.

Initial motiviert durch die Kontaktbeschränkungen im Rahmen der Covid-19 Pandemie, wurde

letztes Jahr bereits die erste Ausgabe des AWTmagazins herausgegeben. Als Ersatz für die sonst üblichen Präsenzveranstaltungen wurde das entstandene Magazin zunächst an die AWT Mitglieder verteilt. Nach der Veröffentlichung dieser ersten Ausgabe hat der AWT gemeinschaftlich beschlossen, dass die im Rahmen der AWT Sitzungen vorgestellten Themen auch nach außen sichtbar gemacht werden sollen.

Dazu haben Sie nun gemeinsam in den vergangenen Wochen Beiträge zu aktuellen Themen aus dem Feld der Wasserstrahltechnologie verfasst. Daraus ist die erste, wirklich offizielle Ausgabe des AWTmagazins entstanden. Diese halten Sie nun in Ihren Händen. Enthalten sind Beiträge aus der Wissenschaft und aus der industriellen Anwendung. Das AWTmagazin ist nun auch für alle Interessenten außerhalb des AWT über Bibliotheken in Papierform oder als PDF zu beziehen.

Wir bedanken uns für die Mitarbeit und wünschen viel Spaß beim Lesen!



Markus Mlinaric, M. Sc.
Sprecher des AWT



Dr.-Ing. Thomas Hassel
Bereichsleiter
Unterwassertechnikum Hannover

Inhaltsverzeichnis

AWTmagazin



- 6 ...** Prof. Dr.-Ing. Hartmut Louis
Grußwort zum AWT Jubiläum
Rückblick auf die Gründung des AWT
- Aktuelles aus der Forschung**
- Markus Mlinaric | Jessica Schönburg
Dr.-Ing. Thomas Hassel
Institut für Werkstoffkunde (IW)
- 8 ...** **Untersuchung zum Lösungsverhalten von Calcium unter Hochdruck**
In-situ Analyse mittels Lumineszenzanregungsspektroskopie
- 13 ...** **Auszug aus dem Protokoll der 1. AWT Sitzung**
- Constantin Männel | Eckart Uhlmann
Institut für Werkzeugmaschinen und Farbikbetrieb (IWF)
- 14 ...** **3-D Einstechbearbeitung zur Erzeugung von Wellen mit kraftübertragenden Wellenabsätzen mittels Wasserabrasivstrahl**
Eine Anwendung des WAIS-Einstechdrehens
- Nermin Redžić et al.
Professur Produktionssysteme und -prozesse (PSP)
- 20 ...** **3-D-Bearbeitung beim Wasserabrasivstrahlschneiden**
Entwicklung eines neuartigen Assistenz- und Überwachungssystems
- Mohammad Dadgar et al.
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT)
- 26 ...** **Kosteneffiziente Bearbeitung von 3-D-Bauteilen durch ein neuartiges Wasserstrahlkonzept**
Kompensation von Konturverletzungen
- Aus der industriellen Anwendung**
- Hans-Martin Meyer
INDA Wasserstrahltechnik
- 34 ...** **Stand und Zukunft der HD-Entgrat- und Reinigungstechnik**
Ein Überblick über Technologie und Potentiale
- Ralf Winzen
INNOMAX AG
- 40 ...** **Präzisions-Wasserstrahlschneiden als integrativer Bestandteil moderner Fertigung**
Wirtschaftliche Prozesskettenintegration von Wasserstrahlanlagen
- Walter Maurer | Klaus Vollrath
WATERJET GROUP
- 44 ...** **Entwicklung und Perspektiven des Micro-Wasserstrahlschneidens**
Herstellung miniaturisierter und feinmechanischer Bauteile
- Werner Stiefel | Michael Ruoff
URACA GmbH & Co. KG
- 50 ...** **Prozess Integration bei der Behälter-Innenreinigung**
Aktueller Stand der Technik und Entwicklungspotentiale

Rückblick auf die 60. Sitzung

Am 11.10.2021 feierte der AWT 30-jähriges Bestehen

Die 60. Sitzung des Arbeitskreises Wasserstrahltechnologie fand am 11.10.2021 in Oelde statt. Erstmals seit Beginn der Covid-19 Pandemie konnte die AWT Sitzung wieder in Präsenz stattfinden. Zum Comeback des Präsenzformats verzeichnete der AWT einen historischen Teilnehmerrekord von 75 Teilnehmern. Bereits am Vorabend der Sitzung reisten die meisten Teilnehmer an, sodass sich gewohnheitsgemäß etwa 50 Vertreter von Industrieunternehmen und Forschungsinstituten zum traditionellen AWT Stammtisch in Rheda-Wiedenbrück einfanden. Die etwa 15-minütige Anreise am Montagmorgen zum Tagungsort in Oelde erfolgte dann bei diesigem, münsterländischen Wetter zum Beginn der Sitzung, pünktlich um 9:00 Uhr.

Nach einer kurzen Begrüßung vom Gastgeber und Veranstalter stellten Forschungsinstitute

ihre aktuellen Arbeiten aus dem Bereich der Wasserstrahltechnologie vor. Zusätzlich gaben auch Industrieunternehmen Einblicke in technologische Herausforderungen aus der Anwendung. Die Beiträge sind in Textform auch ab Seite 8 in diesem Magazin zu finden. Thematisch waren die Vorträge unter anderem dem Verschleiß von Wasserdüsen, CAD/CAM Programmierung, der Hochdruckentgrattechnik und der Unterstützung von Montage- und Spannprozessen durch digitale Assitzensysteme untergeordnet.

Nach einer Stärkung in der gemeinsamen Mittagspause fand das Produkt- und Verfahrensforum statt, in dem Industrieunternehmen aktuelle Entwicklungen und Produkte präsentieren konnten. In diesem Rahmen wurde auch der Termin für die 61. Sitzung des AWT bekannt gegeben.

Aktuelle Informationen dazu sind unter awt.uni-hannover.de zu finden.

Nach Fachvorträgen, Mittagspause, Produkt- & Verfahrensforum und der Aufstellung zum unten auf dieser Seite abgedruckten Gruppenfoto, wurden die AWT Teilnehmer in drei Gruppen durch die Hallen der Hammelmann GmbH geführt. Somit erhielten die Teilnehmer Einblicke in die mechanische Fertigung, die Montage der unterschiedlichen Pumpenserien, Inbetriebnahme sowie in das hauseigene Technologiezentrum.

Die Organisation des AWTs bedankt sich herzlich bei der Hammelmann GmbH für die Ausrichtung der Jubiläumssitzung und bei den Mitgliedern für das Interesse und die rege Teilnahme!



Abbildung 1
Gruppenfoto der Teilnehmer der 60. Sitzung des AWTs am 11.10.2021 bei der Hammelmann GmbH in Oelde

Grußwort zum AWT Jubiläum

Rückblick auf die Gründung des AWT

Hallo AWT-Mitglieder, hallo alle an der Wasserstrahl-Technologie Interessierten.

Vor dreißig Jahren wurde der „Arbeitskreis Wasserstrahl Technologie“ (AWT) gegründet. Eine Gruppe an dieser Technologie Interessierter, d.h. Hersteller von Anlagen und Komponenten, Anwender und potentielle Anwender, hatte am 23.1.1991 beschlossen, diese neue Technologie gemeinsam voranzubringen.

Aber wie kam ein Institut für Werkstoffkunde, deren Hauptarbeitsfelder die Entwicklung, das Verhalten einschließlich der Verarbeitung von Werkstoffen war, dazu, sich mit der Wasserstrahltechnologie als "Fertigungstechnologie" zu befassen? Dazu ist ein Rückblick auf die 60iger Jahre notwendig.

Bedingt durch Leistungssteigerungen u.a. bei Pumpen, Turbinen, Flugkörpern usw. traten in zunehmendem Maße Werkstoffschädigungen auf, die auf das Auftreffen von Feststoffen und/oder Flüssigkeitspartikeln auf die Werkstückoberflächen (z.B. Sanderosion, Flüssigkeitsschlag, usw.) zurückzuführen waren.

Anfang der 60iger Jahre wurde an der damaligen „Technischen Hochschule Hannover“ (heute: Leibniz Universität Hannover) ein zweites „Institut für Werkstoffkunde“ gegründet. Der Institutsleiter, ein ausgewiesener Spezialist für Metallkunde, Metallurgie und Schweißtechnik. Daneben

interessierten ihn besonders 2 Phänomene:

- 1) Kavitation und die daraus resultieren Werkstückschädigungen z.B. an Wasserturbinen und Schiffsschrauben, und
- 2) Flüssigkeitsschlag, d.h. das Auftreffen von Flüssigkeitstropfen mit hoher Relativgeschwindigkeit und daraus resultierenden Werkstückschädigungen.

Diese Phänomene waren auch von großem internationalen Interesse. In Meersburg (Bodensee) fand 1965 die „1. International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact“ statt. Zahlreiche weitere Konferenzen folgten, z.T. mit leicht geänderten Namen.

Es gab schon früh Bestrebungen, die oberflächennahen Werkstückveränderungen nutzbringend einzusetzen, z.B. zum Reinigen oder Entschichten. Der Anwendungsbereich wurde erweitert durch die Weiterentwicklung von Druckverstärkern und Plungerpumpen zu höheren Drücken und Standzeiten. Das Schneiden mit Wasserstrahlen bekam zunehmende Bedeutung. Diese wurde noch verstärkt durch den Einsatz von Wasserstrahlen, denen Abrasivpartikel beigemischt wurden. Zunächst als 3-Phasenstrahl (Wasser, Luft und Partikel), dann auch als Suspensionsstrahl, bestehend aus Wasser und Abrasivpartikel.

Das führte international zu Konferenzen, die sich mit der Nutzanwendung dieser Phänomene beschäftigten. „BHR Group“ in Großbritannien, ein Forschungs- und Technologietransfer-Zentrum, erkannte das frühzeitig. In Coventry wurde 1972 das 1. „International Symposium on Jet Cutting Technologie“ durchgeführt. Seitdem findet es alle 2 Jahre an verschiedenen Orten statt. Das „5. Symposium on JCT“ wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstoffkunde 1980 in Hannover durchgeführt.

Auch in den USA gab es eine ähnliche Entwicklung. 1981 fand in Golden, Colorado die „1. US Water Jet Conference“ statt, danach regelmäßig im 2-Jahres-Turnus.

Auf der 2. Konferenz, jetzt "American Water Jet Conference" 1983 in Missouri-Rolla, Missouri wurde die "Water Jet Technologie Association" (WJTA) gegründet.

Das Interesse an diesen Symposien war und ist sehr groß, sie fanden bzw. finden weltweit statt. Mittlerweile ist die Wasserstrahltechnologie in wesentlichen Bereichen „Stand der Technik“. Was hat das alles mit dem AWT zu tun?

1990 fand in Amsterdam das „10. International Symposium on Jet Cutting Technologie“ statt. Im gleichen Zeitraum erschien eine Broschüre, in der viele auf dem Gebiet der Nutzanwendung der Wasserstrahltechnik in Japan tätigen Firmen ihre Produkte kurz (auf einer Seite) vorstellten.

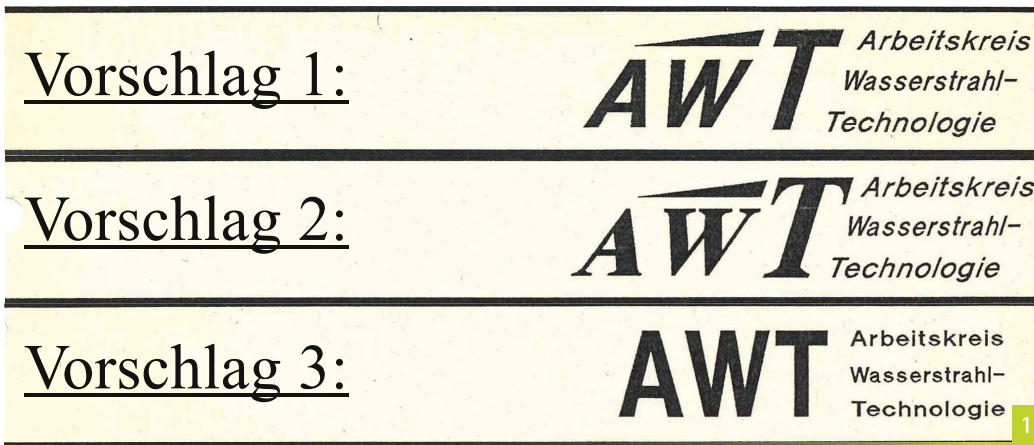


Abbildung 1
 Auszug aus der Anlage 5-2 des Protokolls der ersten AWT Sitzung am 07.03.1991: Erste Vorschläge des Logos für den neugegründeten Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie

In Deutschland war eine derartige „Zusammenarbeit“ mir nicht bekannt, eher im Gegenteil. Im Jahr 1990 trug der VDI (VDI Bildungswerk) der Bedeutung und dem Potential dieser Technologie Rechnung. Der VDI trat an das Institut für Werkstoffkunde heran, mit der Bitte eine Informationsveranstaltung zum Thema „Der Wasserstrahl als Werkzeug“ durchzuführen. Diese fand erstmals am 23./24. Januar 1991 in Hannover statt und enthielt neben Grundlagen auch wesentliche Informationen von Herstellern und Anwendern.

Da allgemein ein großes Interesse an dieser Technologie bestand, Informationen aber nicht so leicht wie heutzutage zu bekommen waren, wurde am Vorabend des VDI-Seminars beschlossen, ein Forum zu schaffen, das Hersteller, Anwender und Interessierte an der Wasserstrahltechnologie zusammenbringt.

Es war der 23. Januar 1991. Der AWT war gegründet. Das „1. AWT-Meeting“ fand in Hannover am 7.3.1991 statt.

Die AWT-Meetings informieren über neueste Entwicklungen, geben ausgewählte Präsentationen wieder und sind so organisiert, das viel Raum für persönliche Gespräche gegeben ist.

Ich möchte mich herzlich bedanken

- bei den Mitgliedern des AWT, die durch gemeinsame Projekte, aber auch durch Geräte und Verbrauchsmaterial die Forschung aktiv gefördert bzw. ermöglicht haben
- bei der Institutsleitung, die die Aktivitäten ermöglicht und unterstützt, und besonders
- bei meinen ehemaligen Mitarbeitern und den jetzigen Mitarbeitern des Institutes, die neben ihrer regulären Tätigkeit den Arbeitskreis am Laufen gehalten haben.

Ein letztes Wort an die AWT-Mitglieder:

Bitte vergessen Sie nicht, es ist IHR AWT. Ihr Input hält den AWT am Leben.

Danke für Ihr Vertrauen, auch im Namen der Mitarbeiter des Instituts.

Hartmut Louis



Prof. Dr.-Ing. Hartmut Louis

Untersuchungen zum Lösungsverhalten von Calcium unter Hochdruck

In-situ Analyse mittels Lumineszenzanregungsspektroskopie

Das Wasserstrahlschneiden ist ein vielseitig einsetzbares Trennverfahren. Es existieren unterschiedliche Verfahrensvarianten, die eines gemein haben: Ihr grundlegendes Funktionsprinzip ist die Umwandlung von potentieller (Druck-)Energie von verdichtetem Wasser in kinetische Energie durch eine Düse [1]. Beim Wasserabrasivinjektors-trahlschneiden (WAIS) und Reinwasserstrahlschneiden (RWS) werden Düsen der gleichen Bauform eingesetzt. Sie bestehen in der Regel aus einem keramischen Düsenstein, der in einem metallischen Düsenkörper eingefasst ist. Als für die Strahlerzeugung verantwortliches Bauteil ist die Düse von zentraler Bedeutung für den Gesamtprozess [2].

Die Wasserdüse bestimmt die erzielbare Schnittqualität, Schneidleistung, Prozesswirkungsgrad, Geräuschemissionen etc. Sie ist einer hohen Last ausgesetzt und unterliegt fortschreitendem Verschleiß. Bei Überschreiten einer kritischen Verschleißgrenze gewährleistet die Düse keine hinreichende Strahlqualität mehr und muss ausgetauscht werden. Um eine ausreichende Düsenstandzeit zu gewährleisten, werden Düsensteine aus verschleißbeständigen Werkstoffen gefertigt. Am häufigsten werden dabei synthetische Saphire eingesetzt [2]. Nominal erreichen diese Düsen Standzeiten von 50 – 100 Stunden [3]. In der Praxis werden diese Standzeiten jedoch kaum erreicht. Als Grund dafür wird häufig die lokal eingesetzte Wasserqualität genannt. Der Einfluss des Prozessmediums auf die Düsenstandzeiten ist jedoch nur unzureichend untersucht.

Es existieren unterschiedliche, nicht hinreichend belegte Theorien zum Verschleißverhalten von Wasserdüsen. Unter anderem stehen im Leitungswasser gelöste Stoffe im Verdacht, unter Betriebsbedingungen aus dem Wasser auszukristallisieren und als Feststoffe Schädigungen des Düsensteins hervorzurufen. Um diese Effekte messtechnisch erfassen zu können, ist eine in-situ Beobachtung des Mehrstoffsystems erforderlich, da die Effekte reversibel und damit nach einer Entspannung des Wassers nicht mehr nachweisbar sind.

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde das Verhalten von in Wasser gelöstem Calciumcarbonat (CaCO_3) in einem geschlossenen Probenvolumen bis zu einem Druck von 200 MPa untersucht. Als eine von vielen aus Leitungswasser ausfallenden Komponenten wird CaCO_3 stellvertretend für verschiedene andere im Leitungswasser gelöste Stoffe (z. B. Silikate) analysiert. Die angewendete Analysemethodik lässt sich in weiterführenden Untersuchungen auch auf diese anderen Stoffe übertragen.

Methoden

Bei der in-situ Analyse von im Wasser gelösten Stoffen ist es von besonderer Bedeutung, dass die Analysemethode nicht invasiv ist und die Vorgänge im Wasser nicht oder nur in vernachlässigbar geringem Maß beeinflusst. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür die Methode der Lumineszenzanregungsspektroskopie eingesetzt. Bei dieser Methode wird Licht des sichtbaren Spektrums (Wellenlänge $\lambda = 400 \dots 800 \text{ nm}$) zur Anregung der Probenmoleküle eingesetzt. Bei Anregung des jeweiligen Moleküls wird zunächst ein diskreter, molekülspezifischer Betrag an Energie absorbiert und anschließend beim Übergang in seinen Grundzustand abgegeben. Das Planck'sche Wirkungsquantum stellt den Zusammenhang zwischen Energie und der Frequenz elektromechanischer Strahlung her [4]:

$$E = h \cdot f$$

Wellenlänge und Frequenz hängen über die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum voneinander ab:

$$\lambda = c/f$$

Durch die Detektion der Wellenlänge der emittierten Strahlung eines zuvor angeregten Moleküls lässt sich also auf die spezifische Energie des jeweiligen Übergangs und somit auf das vorliegende Molekül selbst schließen.

Spektrometrische Verfahren zeichnen sich grundsätzlich durch eine äußerst geringe Beeinflussung der jeweiligen Probe aus – sie sind also nicht invasiv. Je nach eingesetztem spektrometrischen Verfahren, können die zu beobachteten Effekte jedoch sehr schwach sein. Bei der Erfassung der von der Probe emittierten, elektromagnetischen Strahlung kann dadurch die Anregungslichtquelle die Emissionsintensität überlagern [5]. Die durch molekülspezifische Übergänge hervorgerufene Emission kann somit nicht oder nur sehr unzuverlässig messtechnisch erfasst werden.

Die Strahlengänge von Anregungslichtquelle und Photodetektor sind daher bei der Lumineszenzanregungsspektroskopie im Winkelversatz zueinander angeordnet. Das Spektrometer zeichnet so lediglich den innerhalb des Probenvolumens reflektierten Anteil des Anregungslichts auf, da sich das Spektrometer nicht im Strahlengang der Anregungslichtquelle befindet. Durch diese Anordnung wird gewissermaßen eine physikalische Filterung des

Messsignals vorgenommen. Die Lumineszenz muss trotz der Filterung der Anregung die Detektionsschwelle des Spektrometers überschreiten. Sie hängt von den jeweiligen Spezifikationen der eingesetzten Messtechnik ab und muss z. B. im Grundrauschen abbildbar sein. Abhängig ist die Lumineszenzintensität von dem zu detektierenden Molekül sowie seiner Konzentration im Probenvolumen. Schwache Lumineszenzeffekte können durch den Einsatz von sog. Lumineszenzmarkern verstärkt werden. Diese werden dem Probenvolumen hinzugefügt und gehen chemische Verbindungen mit den zu untersuchenden Molekülen ein. Lumineszenzeffekte können so erheblich verstärkt werden. Die Methode der Lumineszenzanregungsspektroskopie eignet sich grundsätzlich für alle transparenten Proben, bei denen der Strahlengang von Anregung und Detektion gewinkelt angeordnet werden kann.

Ein Stoff, der gelöst im Leitungswasser vorliegt und der in Verdacht steht am Düsenverschleiß beteiligt zu sein, indem er in fester Form aus der wässrigen Lösung Leitungswasser ausfällt, ist Calciumcarbonat (CaCO₃) – besser bekannt als Kalk. Calciumcarbonat kann bei lokaler Übersättigung der Lösung homogen oder heterogen als Feststoff auskristallisieren. Bevorzugt läuft dabei die heterogene, d.h. an Fremdkeimen angelagerte, Kristallisation ab. Als Fremdkeime können beispielsweise Schwebstoffe im Wasser oder die rauheitsbehafteten Rohrwandungen dienen. Calciumcarbonat kann in unterschiedlichen Modifikationen ausfallen, welche sich wiederum abhängig von

den Umgebungsbedingungen ausprägen. Unter den in der Wasserhochdrucktechnologie üblichen Bedingungen, fällt das Calciumcarbonat als Calcit aus. Weitere Modifikationen sind Aragonit und Vaterit.

Carbonate stellen meist die mengenmäßig am stärksten vertretene Stoffgruppe im Leitungswasser dar. Die Strukturformeln des Ca²⁺ Kations und der Carbonatgruppe sind in Abbildung 1 dargestellt. Im kristallinen Zustand (Calcit) liegen diese in einer trigonalen Raumgruppe vor [6]. In Lösung sind die Kat- und Anionen wie dargestellt vollständig dissoziiert.

Durch die Doppelbindung im Carbonatmolekül eignet sich dieses grundsätzlich gut zur optischen Anregung, da die Elektronenpaare der Doppelbindung beiden Atomen zugeordnet sind und dadurch keine feste Zugehörigkeit aufweisen. Da diese Doppelbindung allerdings auch unverändert in der kristallinen Ausprägung besteht, eignet sie sich nicht, um das Kristallisationsverhalten im Leitungswasser zu untersuchen.

Zur Untersuchung der druckabhängigen Veränderungen des Lösungsgleichgewichts wird der wässrigen Lösung daher ein sog. Lumineszenzmarker hinzugefügt. Dabei handelt es sich um eine Indikatorflüssigkeit, die mit einem bestimmten Lösungsbestandteil Molekülkomplexe mit ausgeprägten Lumineszenzeigenschaften bildet. Für die Untersuchung der Carbonatfällung unter Druckbeaufschlagung wird der spezielle Marker Calcein eingesetzt. Dieser Indikator geht eine Bindung mit den in der Lösung dissoziierten

Ca²⁺ Kationen ein. Daraus ergibt sich die Hypothese, dass eine ausgeprägte Fluoreszenz der Lösung zu beobachten ist, so lang Calciumcarbonat in Lösung vorliegt. Fällt Calcit aus der Lösung aus, nimmt diese Fluoreszenz aufgrund des Mangels an freien Ca²⁺ Kationen ab [7].

Die Calcein Lumineszenz tritt bei Anregung des Molekülkomplexes mit einer Wellenlänge von 494 nm auf. Zu diesem Zweck wird im Versuchsaufbau eine Weißlichtquelle mit einem einfachen Monochromator ausgestattet. Mit Hilfe eines Prismas bewirkt dieser eine Zerlegung des Weißlichts in seine Wellenlänge. Durch eine einstellbare Blende wird Licht mit der erforderlichen Wellenlänge isoliert. In Abbildung 2 ist der Strahlengang sowie die Lumineszenz eines Probenvolumens unter atmosphärischen Bedingungen deutlich zu erkennen.

Versuchsaufbau

Vor Beginn der Messungen wird der Monochromator der Anregungslichtquelle und damit die Wellenlänge der Anregung justiert. Dazu wird das Spektrometer im Strahlengang der Lichtquelle ausgerichtet und das Anregungsspektrum aufgezeichnet (vgl. Abbildung 3 a). Wie für die Lumineszenzanregungsspektroskopie erforderlich, wird das Spektrometer nach der Justierung im Winkelversatz angeordnet und der Durchbruch für die Justierung mit einem Blindstopfen verschlossen (vgl. Abbildung 3 b)).

Zur in-situ Untersuchung von wässrigen Lösungen im Kontext der Wasserhochdrucktechnologie wird daraufhin die Probenlösung in die mit Hochdruckfenstereinheiten ausgestatteten Druckkammer eingefüllt. Die Druckbeaufschlagung der Kammer erfolgt durch einen kommerziell verfügbaren Druckübersetzer des Typs BFT Servotron 40.37. Um im Probenvolumen ein definiertes Testfluid untersuchen zu können, ist im Inneren der Druckkammer ein Kolben eingebracht, der sie in zwei voneinander getrennte Volumen unterteilt. Gewisser-

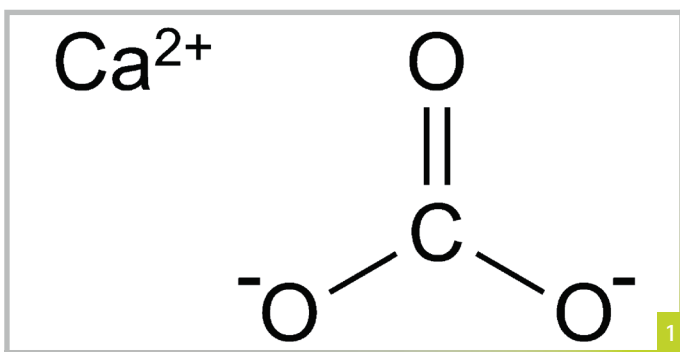


Abbildung 1
Strukturformel des Calcium Kations (links) und des Carbonat Anions (rechts).

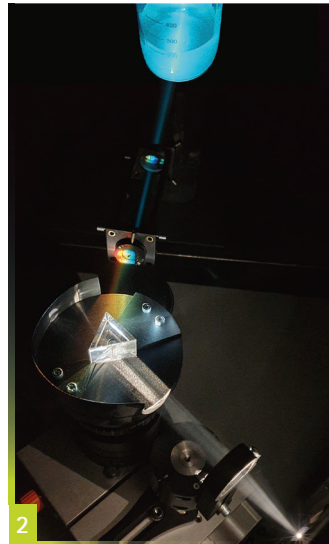


Abbildung 2
Anregungslichtquelle mit einfachem Monochromator. Im Hintergrund ist ein lumineszierendes Probenvolumen zu erkennen. Es handelt sich dabei um wässrige CaCO₃-Lösung mit dem Lumineszenzmarker Calcein.

maßen kann dieser Kolben als 1:1 Druckübersetzer angesehen werden. Für die Befüllung und Entlüftung des Untersuchungsvolumens sind unterschiedliche Rohrleitungen mit Handventilen vorgesehen. Die Befüllung erfolgt unter atmosphärischem Druck nach festgelegtem Ablauf:

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. Zur Detektion wird die Lumineszenz der Testlösung in einem dispersiven Spektrometer in seine Wellenlänge zerlegt und elektronisch weiterverarbeitet. So wird die Intensität der Lumineszenz abhängig von der emittierten Wellenlänge dargestellt. Die Testlösung emittiert nach Anregung mit einer Wellenlänge von 494 nm Licht mit 514 nm. Die Abnahme der Calcium-Ionen in Lösung ist also mit der Abnahme der spektralen Intensität im Bereich von 514 nm verbunden.

Ergebnisse

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wird das Spektrometer auf den Versuchsaufbau kalibriert. Dadurch kann eine Fehlinterpretation der Messungen aufgrund druck- oder zeitabhängiger Veränderungen ausgeschlossen werden. So ergibt sich beispielsweise durch die Druckbeaufschlagung und der daraus resultierenden, elastischen Verformung der Druckkammer, eine Änderung der optischen Weglänge zwischen den beiden Sichtfenstern. Um solche Störeinflüsse ausschließen zu können, werden vor dem Einfüllen der Testlösung Leermessungen mit destilliertem Wasser durchgeführt. Um einen zeitabhängigen Drift der Messergebnisse zu quantifizieren, werden zudem auch Spektren zeitabhängig aufgelöst. Die Spektren der Kalibriermessungen werden dann als Referenz für folgende Messreihen verwendet.

Abbildung 4 zeigt die Lumineszenzanregungsspektren der Druckstufen von 0 bis 200 MPa bei unterschiedlichen, relativen CaCO₃ Sättigungen der Testlösung.

Die Druckbeaufschlagung erfolgt stufenweise, sodass jede Messung einen quasistationären Charakter aufweist. Die Aufzeichnung des Spektrums erfolgt nach der Druckbeaufschlagung jeweils nach einer Abklingzeit von zehn Sekunden. Die dargestellten Spektren sind bereits auf den Wellenlängenbereich der Fluoreszenz des Indikators

Calcein von 500 bis 530 nm reduziert. Als Testlösung wird eine wässrige Calciumcarbonatlösung mit unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen verwendet. Die maximale Löslichkeit bei 20 °C beträgt 14 mg/l. Die verwendeten Testlösungen weisen eine relative Konzentration von 25 %, 50 %, 75 % und 100 % der maximalen Löslichkeit auf. Mit jeder Testlösung werden jeweils die Druckstufen 0 MPa, 10 MPa, 50 MPa, 100 MPa, 200 MPa gemessen.

Es ist durch die Gegenüberstellung der vier Diagramme eine mit der relativen Konzentration abnehmende Fluoreszenzintensität von 100 % bis 25 % rel. CaCO₃ Konzentration zu erkennen. Da der Fluoreszenzmarker Calcein eine Bindung mit den gelösten Ca²⁺ Ionen eingeht, entspricht dieses Messergebnis den Erwartungen. Bei den Testlösungen unterschiedlicher relativer CaCO₃ Konzentration ist zusätzlich jeweils auch eine Abnahme der Fluoreszenzintensität mit steigendem Druck zu erkennen. Das lokale Intensitätsmaximum liegt bei 517 nm, was einer Messabweichung von 3 nm zum Erwartungswert von 514 nm entspricht.

Um ein über die Stichprobe der willkürlich gewählten Messpunkte hinaus Aussagen über das System Wasser-Calciumcarbonat unter Druckbeaufschlagung treffen zu können, werden die Messpunkte im Folgenden als Stützpunkte einer Funktion verwendet. Die Lage der unter-

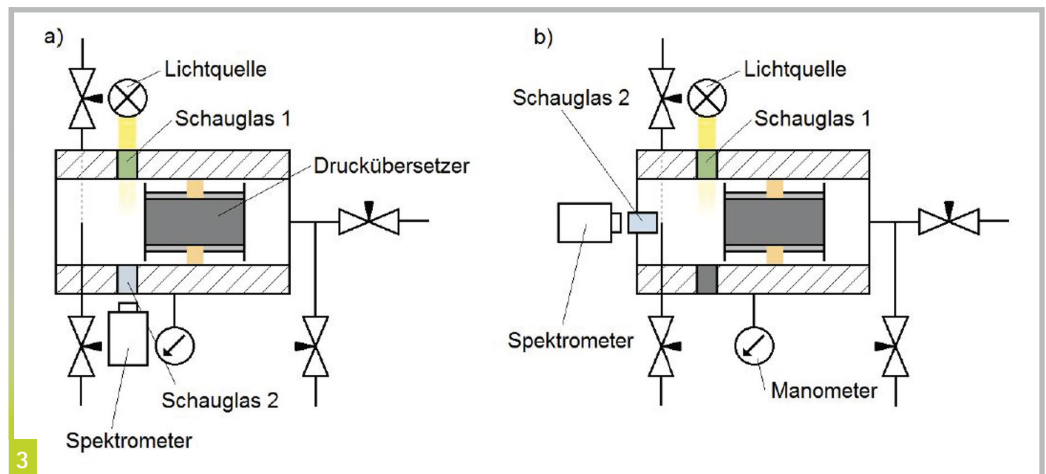


Abbildung 3
Schematische Darstellung des Aufbaus der Druckkammer mit zwei voneinander abgedichteten Volumina und Hochdruckfenstereinheiten für die Lumineszenzanregungsspektroskopie; a) Justierung des Monochromators auf erforderliche Anregungswellenlänge, b) Messaufbau für die Lumineszenzanregungsspektroskopie.

schiedlichen Messpunkte lässt sich mathematisch durch eine Ebenengleichung beschreiben, welche aus den gemessenen Werten angenähert werden kann. Es lässt sich so ein Zusammenhang der Einflussgrößen über ein breites Parameterfenster aufzeigen. In dem gemessenen, lokalen Intensitätsmaximum wird durch lineare Regression die folgende Ebenengleichung abgeleitet:

$$I_{c,p} = -0,351 - 3,851 \cdot 10^{-4} \cdot p + 0,003212 \cdot c$$

$I_{c,p}$ Rel. Spektrale Intensität in 104 counts

p Druck in MPa

c relative Konzentration in %

Abbildung 5 zeigt die aus der Regression resultierende Abhängigkeit der spektralen Intensität von CaCO_3 Sättigung der Testlösung und der Druckbeaufschlagung. Die lineare Regression wurde hier aufgrund ihrer Robustheit gegen Ausreißer bevorzugt angewendet. Die Regression weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9684$ auf.

Die Abnahme der spektralen Intensität bedeutet eine geringere Verfügbarkeit von Ca^{2+} Ionen in der Lösung für die Bindung an den Calceinmarker. Ein möglicher Grund dafür ist, dass das Calcium nicht mehr dissoziiert in Lösung vorliegt, sondern als Feststoff aus der Lösung auskristallisiert ist. Feststoffpartikel sind mit der verwendeten Methode nicht direkt nachweisbar. Es kann lediglich dieser indirekte Rückschluss gezogen werden.

Die Messungen zeigen deutlich, dass die Lumineszenzanregungsspektroskopie durch Verwendung eines geeigneten Indikators eine leistungsfähige Methode zur in-situ Untersuchung von wässrigen Lösungen unter Druck sein kann. Die rel. spektrale Intensität stellt in der vorgenommenen Regression den Regressanden dar. Als Regressoren werden die Einflussgrößen bezeichnet, von denen der Regressant abhängig ist. Es ist dabei zu beachten, dass die Druckbeaufschlagung eine externe Störgröße darstellt, deren Wert stets bekannt ist. Die Druck-

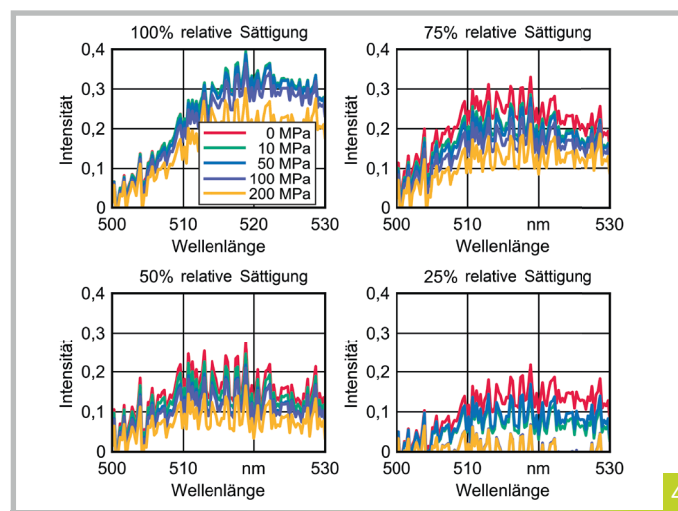


Abbildung 4
 Auf den Wellenlängenbereich von 500 bis 530 nm reduzierte UV-VIS Spektren zur Referenzierung der Messungen.

beaufschlagung kann beliebig eingestellt und direkt gemessen werden. Durch den bekannten Druck kann durch die Messung der spektralen Intensität einer Calciumcarbonat Testlösung mit dem Lumineszenzmarker Calcein also aus dem Regressionsmodell auf die gelöst vorliegende Stoffmenge geschlossen werden. Bei bekannter Ausgangskonzentration kann damit dann wiederum der Anteil des Calciumcarbonats, welcher aus der Lösung auskristallisiert ist, bestimmt werden.

Grenzen der Methodik

Die beschriebenen Untersuchungen wurden mit dem Zweistoffsystem Wasser als Lösungsmittel und Calciumcarbonat durchgeführt. In diesem System beträgt die maximale Löslichkeit für Calciumcarbonat 14 mg/l. Im Leitungswasser liegt jedoch meist eine deutlich höhere Carbonatkonzentration vor. Unter Beteiligung von Kohlensäure (H_2CO_3) entsteht als Zwischenprodukt Calciumhydrogencarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), welches eine vielfach höhere Löslichkeit von 16.600 mg/l in Wasser aufweist. In Lösung liegen die Kat- und Anionen Ca^{2+} und HCO_3^- vor. Diese stehen wiederum für die Kristallisation aufgrund sich verschiebender Lösungsgewichte zur Verfügung. Das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Regressionsmodell hat daher nur begrenzte Gültigkeit und lässt sich ohne weiterführende Arbeiten nicht auf Leitungswasser übertragen. Die Stoffmenge von dissoziierten Calcium Kationen

kann die maximale Löslichkeit im Zweistoffsystem deutlich überschreiten und damit außerhalb der Modellgrenzen liegen. Auch innerhalb der Modellgrenzen bleibt es von elementarer Bedeutung, die Ausgangskonzentration in der jeweiligen Testlösung zu bestimmen.

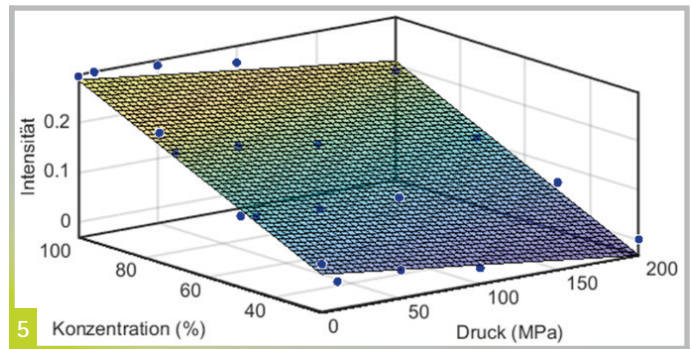
Die bisher durchgeführten Untersuchungen sind zudem nur ein direkter Nachweis einer abnehmenden Nachweisbarkeit von Calcium Kationen in wässriger Lösung mit steigendem Druck. Es besteht die Hypothese, dass der nicht mehr nachweisbare Calciumanteil in Lösung stattdessen als Feststoff auskristallisiert ist. Diese Hypothese kann jedoch durch die Messreihen nicht bestätigt werden. Sie ist dadurch auch nicht widerlegt. Die Messreihen stützen die Hypothese. Für die weitergehende Verifizierung sind zusätzliche Untersuchungen notwendig.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Studie zeigt, dass durch die Methode der Lumineszenzanregungsspektroskopie eine in-situ Analyse von wässrigen Lösungen und ihrer Bestandteile möglich ist. Um die Lumineszenz- und damit die detektierbare spektrale Intensität zu erhöhen wurde ein dem zu untersuchenden Stoff entsprechenden Lumineszenzmarker zu Hilfe genommen. Es wurde damit das Zweistoffsystem Calciumcarbonat-Wasser bis zu einem Druck von 200 MPa untersucht und die gemessene

spektrale Intensität mit der Sättigung der Testlösung sowie der Druckbeaufschlagung korreliert.

Hohe spektrale Intensität hängt durch die Eigenschaften des Lumineszenzmarkers Calcein mit einer hohen Konzentration von Ca^{2+} Kationen in Lösung zusammen. Mit zunehmender Druckbeaufschlagung ist bei den Testmessungen mit unterschiedlicher CaCO_3 Sättigung jeweils eine Abnahme der Lumineszenz zu beobachten. Diese Abnahme der Lumineszenz weist auf weniger gelöstes Calcium im Testvolumen hin. Ein Grund für die Abnahme der Calciumkonzentration der Lösung kann das Auskristallisieren von Calcit aus der Lösung sein. Dieses ist durch den verwendeten



Marker nicht nachweisbar und hat daher die Abnahme der Lumineszenz zur Folge.

Um weitere Schlussfolgerungen und ggf. Nachweise zu führen, müssen die Modellgrenzen insbesondere in Hinblick auf das Mehrstoffsystem Wasser, Kohlen-

säure, Calciumcarbonat sowie für weitere im Leitungswasser vorhandene Stoffe erweitert werden. Diese Arbeit können in Zukunft ein umfangreiches Verständnis der für den Düsenverschleiß in der Wasserstrahltechnologie verantwortlichen Mechanismen bieten.

Abbildung 5

Rel. spektrale Intensität in Abhängigkeit von rel. Konzentration von CaCO_3 in wässriger Lösung und der Druckbeaufschlagung.

Referenzen:

[1] Kolb M., *Wasserstrahlschneiden: Materialbearbeitung mit einem Hochdruckwasserstrahl*. Die Bibliothek der Technik, Bd. 295. Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 2006.

[2] Powell M., *Optimization of UHP Waterjet Cutting Heads, the Orifice*. WaterJet Technology Association (ed) Proceedings of the 2007 WJTA American Waterjet Conference, 2007.

[3] Radovanovic M., *Performances of Abrasive Water Jet Cutting with Hyper Pressure*. International Journal of Modeling and Optimization, 2017.

[4] Lechner MD., *Einführung in die Quantenchemie: Aufbau der Atome und Moleküle, Spektroskopie*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2017.

[5] Perkampus H-H., *UV-VIS-Spektroskopie und ihre Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1986.

[6] Doelter C., *Allgemeine Einleitung - Kohlenstoff - Carbonate - Silicate I: Band I*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1912.

[7] Life Technologies Corporation, *Calcein AM: User Guide*. Catalog Numbers C1430, C3099, and C3100, 2020.



Markus Mlinaric, M. Sc.

Markus Mlinaric hat Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover studiert und ist seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde sowie Sprecher des Arbeitskreises Wasserstrahltechnologie (AWT).
Kontakt: mlinaric@iw.uni-hannover.de



Jessica Schönburg

Jessica Schönburg studiert Maschinenbau im Master an der Leibniz Universität Hannover und arbeitet seit 2019 als wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Montagetechnik (MATCH) in Garbsen.
Kontakt: schoenburg@stud.uni-hannover.de



Dr.-Ing. Thomas Hassel

Dr.-Ing. Thomas Hassel studierte Werkstoffwissenschaften an der Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 2008 ist er im Institut für Werkstoffkunde Leiter des Bereichs Unterwassertechnikum Hannover.
Kontakt: hassel@iw.uni-hannover.de

Auszug aus dem Protokoll der 1. AWT Sitzung

Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie gegründet

Am 23.1.1991 wurde im Institut für Werkstoffkunde an der Universität Hannover der "Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie" (AWT) gegründet. An diesem Treffen nahmen insgesamt 24 Personen - überwiegend Industrievertreter - teil.

Die Wasserstrahltechnologie umfaßt das Schneiden und Reinigen mit Hochdruckwasserstrahlen und Wasserabrasivstrahlen. Ziel dieses Arbeitskreises soll ein verbesserter Informationsaustausch zwischen Forschungs- und Entwicklungsstellen, Herstellern, Lieferanten, Anwendern und Betreibern sowie eine verstärkte Öffentlichkeitsarbeit sein, um der Technologie zu einer breiteren Anwendung zu verhelfen. Zu den Aufgaben dieses Arbeitskreises zählt der regelmäßige Informationsaustausch z.B. über nationale und internationale Tagungen sowie öffentlich geförderte Forschungsvorhaben. Daneben versteht sich der Arbeitskreis als Institution zur Erarbeitung von einheitlichen Begriffen, Qualitätskriterien und Sicherheitsrichtlinien.

Im Rahmen der ersten Arbeitssitzung am 7.3.1991 in Hannover (43 Teilnehmer) wurden zur Umsetzung der o.g. Ziele und Aufgaben zunächst drei Arbeitsgruppen gebildet, die sich mit Sicherheitsaspekten, der Vereinheitlichung einschlägiger Begriffe und der Öffentlichkeitsarbeit beschäftigen sollen.

Zur aktiven Mitarbeit in diesem Arbeitskreis sind alle Interessenten aus Industrie und Forschung eingeladen.

Die nächste Sitzung des Arbeitskreises findet am 1.10.1991 in Aachen statt. Interessenten setzen sich bitte mit

Prof. Dr.-Ing. H. Louis
Institut für Werkstoffkunde, Universität Hannover
Appelstr. 11 A, 3000 Hannover 1
Tel.: 0511/762-4320, Fax.: 0511 / 762-5245

in Verbindung.

3-D Einstechbearbeitung zur Erzeugung von Wellen mit kraftübertragenden Wellenabsätzen mittels Wasserabrasivstrahl

Eine Anwendung des WAIS-Einstechdrehens

Das Heraustrennen von Volumenelementen mittels Wasserabrasivinjektorstrahl (WAIS) durch zwei sich überlagernde Kerben ist eine effiziente Methode, Hochleistungs- oder Leichtbauwerkstoffe vorzukonturieren. Diese Verfahrensvariante kann mittels WAIS-Einstechdrehen auch zur Bearbeitung von Wellen eingesetzt werden. In dieser Arbeit wird das Erzeugen von kraftübertragenden Wellenabsätzen durch das WAIS Unrunddrehen untersucht und die Anwendung demonstriert.

Unter Verwendung der Wasserstrahltechnologie können prinzipiell alle Werkstoffe bearbeitet werden [1, 2]. Darüber hinaus ist das Verschleißverhalten unabhängig vom bearbeiteten Werkstoff aufgrund der nicht vorhandenen Rückwirkungen des Werkstoffes auf das Werkzeug. Der Verschleiß ist nur von den Strahleigenschaften selbst abhängig [3]. Diese vorteilhaften Verschleißbedingungen treten insbesondere bei der Bearbeitung von Hochleistungs- und Leichtbauwerkstoffen [4, 5] in den Vordergrund, da hierbei die konventionellen Spanverfahren, z. B. Drehen, einem erhöhten Werkzeugverschleiß unterliegen [6]. Den genannten Vorteilen stehen jedoch die Herausforderungen eines energetisch gebundenen Strahls gegenüber. Die Kontrolle über dessen abtrennende Wirkung erfordert ein hohes Maß an Prozessverständnis, wodurch

die erreichbaren geometrischen Strukturen begrenzt werden [7]. Die Kontrolle des Abtrags und die Nutzung des WAIS zum Herstellen von dreidimensionalen Bauteilen [8, 9], deren geometrische Komplexität über die Blechbearbeitung hinausgehen, bieten somit ein Potenzial für die Technologie, insbesondere für schwer zu zerspanende Werkstoffe aus dem Bereich Hochleistungseinsatz z. B. Turbinenelemente [10].

Die Erweiterung der durch das WAIS erzeugbaren geometrischen Strukturen wurde von wissenschaftlicher Seite seit dem Einsatz der Technologie mitbetrachtet. In diesem Zusammenhang wurden die Varianten des WAIS-Drehens [11, 12], Abbildung 1a, sowie des WAIS-Fräsens [13, 14] entwickelt und für vielfältige Anwendungen qualifiziert. Da bei beiden Varianten häufig eine hohe Bearbeitungsdauer und da-

mit einer verringerten Wirtschaftlichkeit besteht [14, 15], wurde die Überlagerung von Kerben mit definierter Kerbtiefe zum Heraustrennen von Volumenelementen in Betracht gezogen [16] und für den Einsatz als Fräsoperation qualifiziert [17]. Aufgrund des sprunghaften Anstiegs des abgetrennten Werkstoffvolumens durch die Entnahme eines Werkstoffsegments bietet diese Prozessvariante eine verbesserte Wirtschaftlichkeit [17]. Diese Prozessvariante kann durch eine axiale, Abbildung 1b, und eine radiale, Abbildung 1c, Drehoperation zur Erzeugung von Wellen eingesetzt werden, Abbildung 1d [18]. Zudem besteht technologisch die Möglichkeit, Funktionselemente, z. B. kraftübertragende Wellenabsätze, mittels Unrunddrehen direkt durch die Wasserstrahlbearbeitung zu erzeugen, Abbildung 1e. Dabei ist, bedingt durch den beim radialen

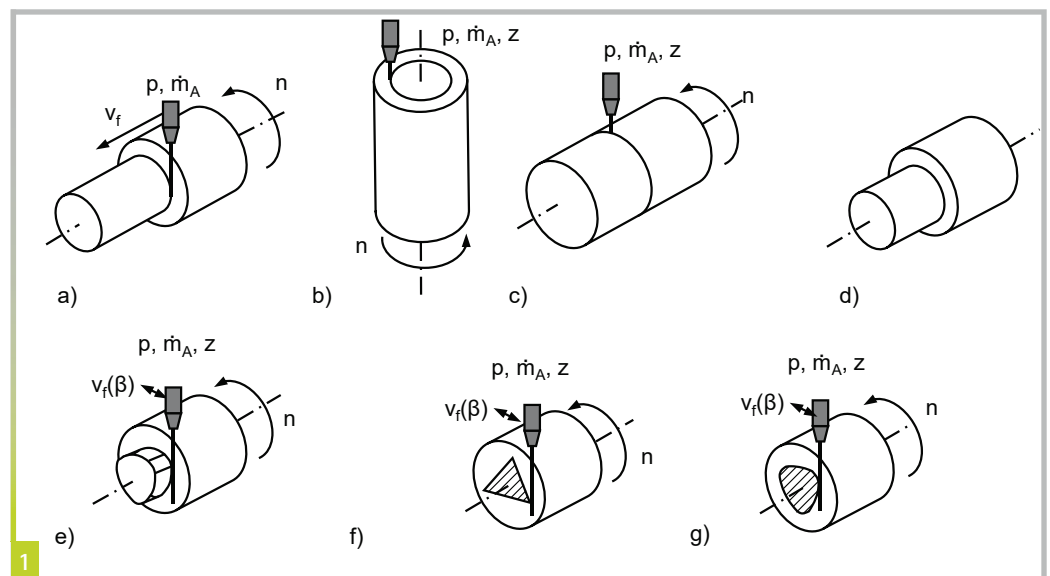


Abbildung 1
 Prozessvarianten beim WAIS Drehen; a) Außen-Längsdrehen; b) Axial WAIS-E; c) Radial WAIS E; d) Durch WAIS-E erzeugte Welle; e) Radial, unrund WAIS-E; f) Schnittfläche mit Linienbegrenzung und einem Werkstückwinkel von $\alpha_w = 60^\circ$; g) Schnittfläche mit stetigem Profil

Einstechdrehen auftretenden Effekt der Strahlaufweitung und die positionsabhängige Werkstoffabtrennung, eine Beeinflussung der Prozessparameter und der Prozessführung auf die Formgenauigkeiten der erzeugten Querschnittsflächen zu erwarten, Abbildung 1f und Abbildung 1g. Diese Auswirkungen sollen in dieser Arbeit anhand von technologischen Untersuchungen zum unrund Wasserabrasivinjektorstrahl-Einstechdrehen (WAIS-E) innerhalb eines Versuchsplans ermittelt und bewertet werden. Zudem soll die Erzeugung einer Welle mittels Überlagerung von Kerben mit definierter Kerbtiefe demonstriert werden, wobei auch die Variante des Unrunddrehens zur Erzeugung eines kraftübertragenden Wellenabsatzes angewendet wird, Abbildung 1e.

Versuchsbedingungen

Zur Bestimmung der Auswirkungen des radialen, unrund WAIS-E auf die Formgenauigkeiten und die Flankenqualität wurde der in Tabelle 1 dargestellte Versuchsplan durchgeführt. Der Versuchsplan umfasst sowohl Eingangsgrößen des Prozesses, den Wasserdruck p und die Drehzahl n , also auch Kenngrößen am Bauteil, den Radius r und den Werkstückwinkel α_w sowie verfahrensspezifische Fertigungsvarianten V . Die Eingangsgrößen des Prozesses können dem Abbildung 2a und Abbildung 2b entnommen werden. Die Kenngrößen am Bauteil sind in Abbildung 3a abgebildet. Die Fertigungsvarianten V sind dem Abbildung 2c zu entnehmen. Die Varianten stehen für verschiedene Durchführungsansätze zur Erzeugung der unrund Einstiche. Bei der Variante A wird der Wasserstrahl von Prozessbeginn an um den Betrag der Einstichlänge l_e bewegt, Abbildung 2c. Bei der Variante B wird im ersten Schritt eine Kerbe durch eine Drehoperation bis zu einer Kerbtiefe $t_k = 0,5 \times d_w - r - l_e$ erzeugt. Im folgenden Schritt wurde die Bewegung des Wasserstrahls um den Betrag der Einstichlänge l_e begonnen. Die Variante C beschreibt einen Schneidprozess bei

Prozess	Parameter	Kürzel	Einheit	Werkstufen		
Radial unrund WAIS-E	Wasserdruck	p	MPa	250	400	
	Drehzahl	n	1/min	5	10	
	Radius	r	mm	4	10	16
	Werkstückwinkel	α_w	°	60	90	120
	Variante	V	-	A	B	C

Tabelle 1 Versuchsplan

ruhendem Werkstück, Abbildung 2c. Diese Variante stellt damit keine reale Drehoperation dar und kann nur sehr eingeschränkt bei Querschnittsflächen mit Linienbegrenzung eingesetzt werden, Abbildung 1f. Diese Variante dient somit vorwiegend als Referenz für die erreichbaren Kenngrößen. Der Versuchsplan wurde vollfaktoriell untersucht und einmal wiederholt.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde der kraftübertragenden Wellenabsatz einer Profildrehmaschine mit Polygonwellenende A P3G 20 nach DIN 32711 [19] mittels unrund WAIS-E umgesetzt, Abbildung 1e. Dabei wurden Einstiche zur Abtrennung von Ringsegmenten an einem Zylinder mit einer Länge $l_w = 78$ mm und einem Durchmesser $d_w = 45$ mm umgesetzt.

Alle Versuche wurden an einer Wasserstrahlanlage vom Typ JETMAX HRX 160L der Firma STM WATERJET GMBH GERMANY, Schweinfurt, durchgeführt. Die Rotation des Werkzeuges

wurde durch eine selbst entwickelte Dreheinheit realisiert, die einen Drehzahlbereich bis $n = 147$ 1/min besitzt und Werkstücke mit einem Durchmesser bis $d_w = 100$ mm aufnehmen kann. Neben den variierten Parametern wurde ein Düsendurchmesser von $d_D = 0,25$ mm, ein Fokusrohr mit einem Durchmesser von $d_f = 0,76$ mm, ein Arbeitsabstand von $l_s = 2$ mm sowie Abrasivmittel Mesh 120 der GMA GARNET (EUROPE) GMBH, Hamburg, eingesetzt. Der Abrasivmittelmassenstrom \dot{m}_A wurde jeweils so gewählt, dass das Verhältnis von Abrasivmittelmassenstrom zu Wassermassenstrom bei $R = 0,2$ liegt. Die Untersuchungen wurden an Titanaluminid vom Typ Ti-43,5Al-4Nb-1Mo 0,1B (TNM-B1) der Firma GFE METALLE UND MATERIALIEN GMBH, Nürnberg, durchgeführt. Die Auswertung der in Abbildung 3 dargestellten Zielgrößen erfolgt nach einer Auftrennung der Kerben mittels Funkenerosion. Die Messung der Flankenrauheit und Flankenwelligkeit wurde mit einem optischen Oberflächenmessgerät vom Typ MICROPROF MPR 100 der

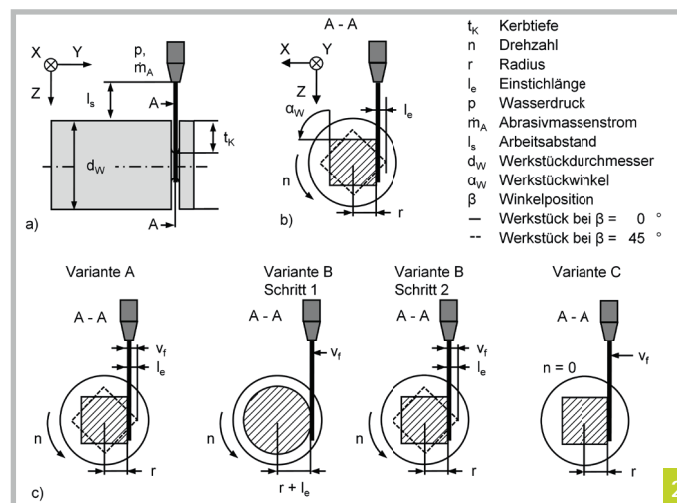


Abbildung 2 Versuchsplanung: a) Frontansicht; b) Schnittansicht mit Prozessparametern am Beispiel des Werkstückwinkels $\alpha_w = 90^\circ$; c) Fertigungsvarianten V

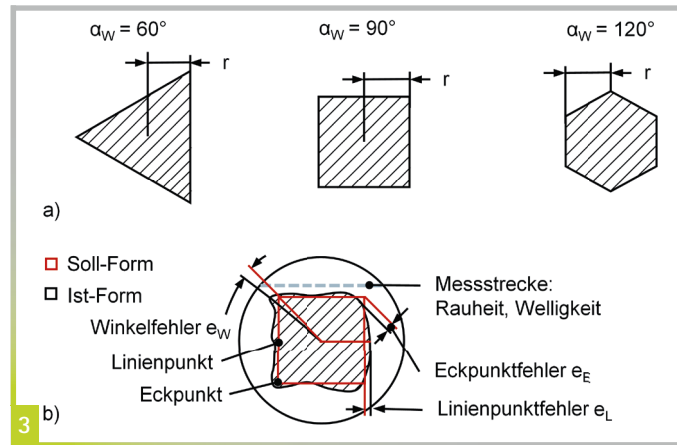


Abbildung 3
Zielgrößen: a) Zielgeometrien;
b) Bewertungsmaßgrößen

FRT GmbH, Bergisch Gladbach, umgesetzt. Die Formkenngrößen Eckpunktfehler e_E , Winkelfehler e_W und Linienpunktfehler e_L wurden aus einer Fotoaufnahme entsprechend dem Abbildung 3b abgeleitet.

Ergebnisse und Diskussion

Zur Bewertung des radialen, un-runden WAIS-E sind insbesondere die erreichbaren Formgenauigkeiten der Querschnittsfläche in Abhängigkeit vom Werkstückwinkel α_W und dem Radius r von Bedeutung. Der Eckpunktfehler e_E ist ein geeignetes Kriterium, um die Formgenauigkeit allgemein zu beurteilen Abbildung 3b. Die Eckpunkte stehen während des Unrundfahrens besonders lange mit dem Strahl im Kontakt und damit könnte eine ungewollte, zusätzliche Werkstoffabtrennung stattfinden, Abbildung 1f. Die Haupteffekte des Werkstückwinkels α_W und des Radius r sind in Abbildung 4 anhand des Eckpunktfehlers e_E dargestellt. Das Abbildung 4 zeigt, dass die untersuchten Eckpunkte im Durchschnitt zu weit innen liegen. Damit scheint die Vermutung einer zusätzlichen

Werkstoffabtrennung bestätigt zu werden. Den Diagrammen in Abbildung 4 ist zudem zu entnehmen, dass der Fehler stark von den Eingangsparametern abhängig ist. Je kleiner bzw. spitzer der Werkstückwinkel α_W ist, desto höher ist der Eckpunktfehler e_E . Zudem steigt der Eckpunktfehler e_E auch mit zunehmendem Radius r . Die Zunahme des Eckpunktfehlers e_E mit spitzerem Werkstückwinkel α_W kann durch eine erhöhte Kontaktzeit mit dem Strahl erklärt werden. Je kleiner der Werkstückwinkel ist, desto weniger Eckpunkte sind vorhanden, Abbildung 3a. Daraus folgt, dass beispielsweise bei einem Werkstückwinkel von $\alpha_W = 60^\circ$ jeder Eckpunkt ein Drittel der Bearbeitungsdauer im Kontakt mit dem Strahl steht, siehe Abbildung 1f, bei einem Werkstückwinkel von $\alpha_W = 120^\circ$ beträgt diese Zeit nur noch ein Sechstel der Bearbeitungsdauer. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass neben der Steigerung des Werkstückwinkels insbesondere die Herstellung eines stetigen Profils, Abbildung 1g, zu einer erheblichen Reduktion eines theoretischen Eckpunktfehlers e_E führen müsste.

Wie im Abbildung 4 dargestellt, steigt der Eckpunktfehler e_E zwar mit zunehmendem Radius, allerdings liegt der prozentuale Eckpunktfehler konstant bei ca. $e_E = 11\%$. Da sich der prozentuale Eckpunktfehler nicht signifikant mit dem Radius r verändert, ist die Ursache weniger in den fertigungsbedingten Strahl- auswirkungen zu suchen. Die Zunahme des Eckpunktfehlers e_E mit dem Radius r ist stattdessen vermutlich auf Positionsungenauigkeiten des Wasserstrahles bzw. auf Beschleunigungs- und Verzögerungseigenschaften des Maschinensystems zurückzuführen, die mit zunehmendem Radius r ebenfalls ansteigen [20, 8].

Neben dem Eckpunktfehler e_E beschreibt der Linienpunktfehler e_L eine weitere relevante Kenngröße der Formgenauigkeit, Abbildung 3b. Im Gegensatz zu einem Eckpunkt wird der Mittelpunkt der Linien während des Unrundfahrens jeweils nur für einen kurzen Moment mittels Wasserstrahl bearbeitet. Dennoch wird dieser Kennwert parameter-unabhängig gut erreicht, mit einer mittleren Abweichung zum Zielwert, dem Radius r , von nur 3,2 %. Die insgesamt geringen Abweichungen sind auf die Durchführungsstrategien zurückzuführen. Wie oben beschrieben, wurden die Versuche jeweils bis zum vollständigen Erreichen der Unrundheit durchgeführt. Dies bedeutet, dass der Strahl während der letzten Umdrehung kein bzw. kaum Werkstoff abtrennt wodurch auch der Mittelpunkt der Linien die Sollgeometrie erreicht. Aus diesem Grund wirkt sich beispielsweise auch der Wasserdruck p nur in geringem Maße auf die Formgenauigkeit aus. Tatsächlich wird durch die Verwendung eines hohen Wasserdrucks von $p = 400$ MPa die Prozesszeit um 20 % reduziert, was mit Ergebnissen aus der Literatur übereinstimmt [16]. Die größten Abweichungen beim Linienpunktfehler e_L ergeben sich durch die Varianten V, welche in Abbildung 5 dargestellt sind und im Folgenden separat diskutiert werden.

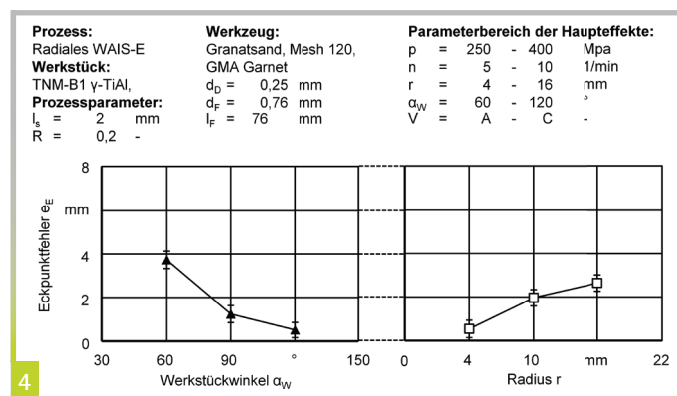


Abbildung 4
Haupteffekte des Werkstückwinkels und des Radius auf den Abstandsfehler am Eckpunkt

Der Winkelfehler am Eckpunkt e_w ist ein zusätzlicher Kennwert zur Beschreibung der Formgenauigkeit der Querschnittsfläche, Abbildung 3b. Im Mittel wurde über den gesamten Versuchsplan ein Winkelfehler von $e_w = 2,7^\circ$ ermittelt. Bei der Analyse der größten Effekte der Prozessparameter auf den Winkelfehler e_w wurde mit zunehmendem Radius r eine Abnahme des Winkelfehlers e_w beobachtet. Die Winkelfehler besitzen jedoch für alle Radien r einen vergleichbaren nominellen Wert der Abweichung im Millimeterbereich. Da bei gleicher Formabweichung bei einem kleinen Radius von $r = 4$ mm ein höherer Winkelfehler entsteht, ergibt sich der beobachtete Verlauf. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Formabweichungen durch den Strahlprozess entstehen. Allerdings wurde für den Winkelfehler e_w eine hohe Standardabweichung s beobachtet, vergleiche Abbildung 5, die keine weiteren signifikanten Effekte erkennen lässt, wodurch eine Erklärung der Ursache des Winkelfehlers e_w erschwert wird.

In Abbildung 5 sind die drei Formgenauigkeitskennwert für die untersuchten Varianten abgebildet. Die Varianten A und B zeigen keine signifikanten Unterschiede. Insgesamt scheint die Variante B einen etwas geringeren Radius r zu erzielen, wodurch der Eckpunktfehler e_E höher und der Linienpunktfehler e_L geringer ausfällt. Bei der Variante C wird kein Eckpunktfehler e_E erzeugt, stattdessen verbleibt zusätzlicher Werkstoff am Eckpunkt bestehen. Allerdings unterschreitet die Variante C den Zielwert am Linienpunkt. Da die Variante C keine reale Drehoperation darstellt, besteht die Möglichkeit, die Prozessparameter so zu optimieren, dass die Zielwerte besser erreicht werden. Aufgrund der beschriebenen begrenzten Anwendbarkeit der Variante C wurde diese Möglichkeit jedoch nicht weiterverfolgt.

Die Oberflächenqualität an den Kerbflanken wurde anhand der Welligkeit und Rauheit bewertet. Dabei wurden zu HASHISH [11]

vergleichbare Spiralmuster auf der Flanke beobachtet. Im Durchschnitt wurde eine Welligkeit von $w_f = 0,45$ mm und eine größte Höhe des Profils von $Rz = 74$ μ m beobachtet. Für diese Kennwerte wurde eine kontinuierliche Reduktion mit zunehmendem Werkstückwinkel gemessen. Darüber hinaus wurde bei der Variante C durchschnittlich eine um 75 % bessere Oberflächenqualität beobachtet. Zwischen den Varianten A und B wurden keine Unterschiede festgestellt.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde die Variante A für die Umsetzung des Polygonwellenendes mit A P3G 20 Profil ausgewählt, da diese beim kritischen Eckpunktfehler e_E einen etwas geringeren Wert als Variante B aufwies und die Variante C für die Geometrie nicht umgesetzt werden kann. Da die Effekte des Wasserdrucks p und der Drehzahl n , wie zuvor beschrieben, nur in

getrennt. Für einen Einsatz der Welle müssten Funktionsflächen, wie z. B. Lagersitze oder das erzeugte Wellenende beispielsweise durch Schleifen auf eine Endkontur nachbearbeitet werden. Bis zur Endkontur wäre noch ein Volumen von $6,2$ cm^3 zu zerspanen. Bei der Anwendung des axialen WAIS-E besteht die Gefahr, dass diese Kerben in den Grundkörper der Welle hineinreichen. Da das axiale WAIS-E für das Fertigen einer Welle notwendig ist, wurden alle erzeugten Fehler der Kerben ermittelt, obwohl die Prozessvariante nicht Untersuchungsgegenstand der Versuchsplanes war und damit nicht optimiert werden konnte. Bei der Kerbe S1 des axial unrund WAIS-E wurde eine maximale Vertiefung über die Sollkerbtiefe hinaus von $e_{S1} = 1,1$ mm gemessen. An der Kerbe S2 des radialen, unrund WAIS-E wurde eine Vertiefung von $e_{S2} = 1,0$ mm beobachtet. Diese Vertiefung

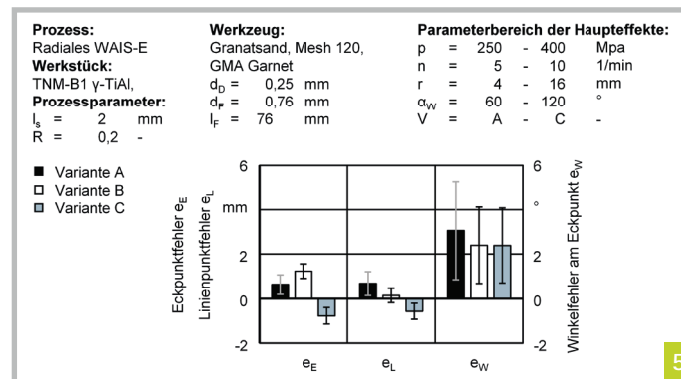


Abbildung 5 Effekte der untersuchten Verfahrensvarianten A, B und C auf die Formgenauigkeitskennwerte

geringem Maße auf die Formgenauigkeit einflussnehmen, wurden für die Kerbe des radialen unrund Einstechdrehens S2 die in Abbildung 6 gezeigten Parameter umgesetzt.

Der Abbildung 6 sind, neben der mittels WAIS-E erzeugte Welle mit Polygonprofil, alle verwendeten Prozessparameter zu entnehmen. Für die Kerben S1 und S2 sind die relativen Vorschubgeschwindigkeiten v_{f10} bis v_{f60} in Abhängigkeit von der Winkelposition β angegeben. Die relativen Vorschubgeschwindigkeiten beziehen sich auf die Auslegungsvorschubgeschwindigkeiten v_{f5} . Insgesamt wurde an der Welle ein Volumen von 40 cm^3 durch WAIS-E ab-

reicht allerdings nicht unter die Zielgeometrie. Vielmehr wurde beim axialen WAIS-E ein Flankenwinkel erzeugt, der zu der Hinterschneidung führt. Dies bedeutet, dass, wie oben beschrieben, am stetigen A P3G 20 Profil keine Eckenfehler bzw. Vertiefungen über die Sollgeometrie auftreten. Die maximalen Vertiefungen der Kerben S4 und S6 liegen unter $e_{S4,S6} = 0,18$ mm, beim axialen WAIS-E erreicht die höchste Vertiefung $e_{S3,S5} = 0,9$ mm. Die Ergebnisse zeigen, dass die durch das radiale WAIS-E erzeugten Kerben sehr geringe Fehler aufweisen. Beim axialen WAIS-E auftretende Vertiefungen sind hingegen weniger kritisch, da sie den Durchmesser der Welle nicht

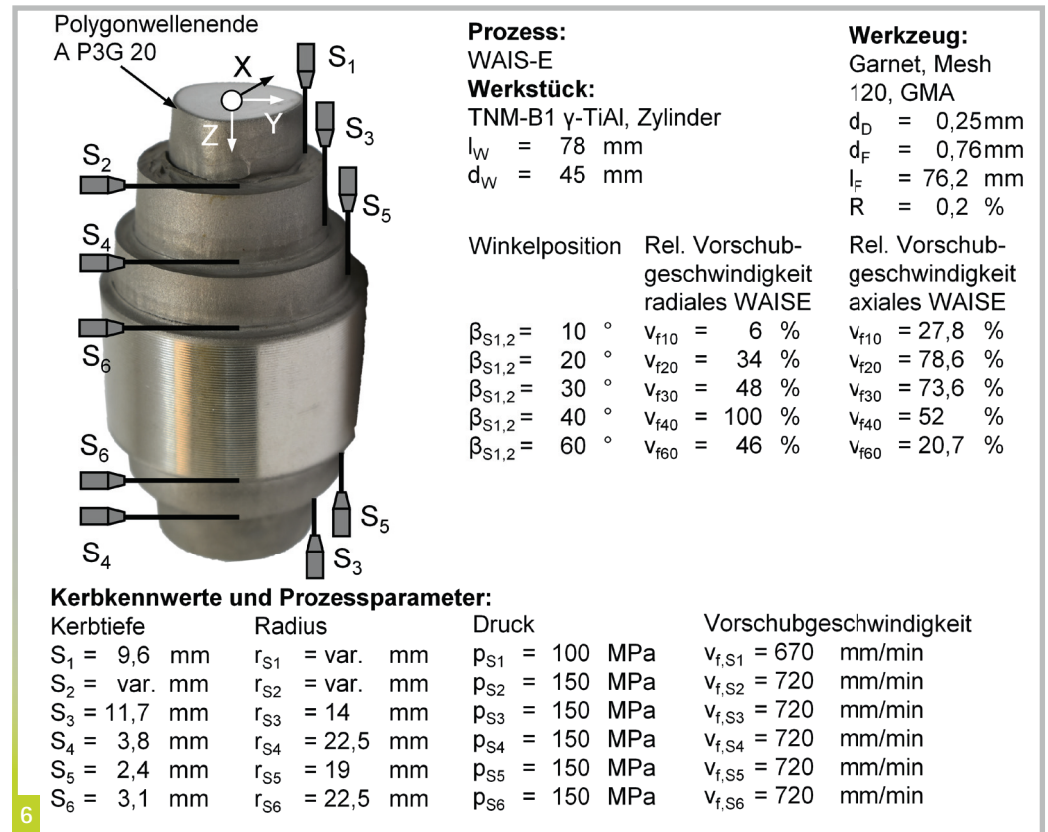


Abbildung 6 Welle mit unrundem Funktionsabsatz

beeinträchtigen. Durch eine Nachbearbeitung würden unter der Annahme des oben genannten zu zerspanenden Volumens von $6,2 \text{ cm}^3$ alle Fehler vollständig entfernt werden. Dabei würden zudem auch die durch das WAIS-E erzeugten Flankenwelligkeiten und Rauheiten entfernt werden.

Zusammenfassung

Durch die Untersuchungen zum radialen, unrundem WAIS-Einstechdrehen wurden die Effekte der Haupteinflussgrößen auf die Formkennwerte einer unrundem Querschnittsfläche sowie die Flankenqualität bestimmt. Es wurde beobachtet, dass sich insbesondere bei kleinen

Werkstückwinkeln erhöhte Eckenfehler zeigen, was auf die Strahl-Werkstück-Kontaktbedingungen zurückgeführt werden konnte. Darüber hinaus wurden Formkennwerte betrachtet, die durch das Maschinensystem beeinflusst werden. Die Untersuchung zur Erzeugung einer Welle verdeutlicht die Einsatzmöglichkeiten von axialen und radialen Einstechdrehoperationen für diesen Anwendungsfall. Zudem konnte das radiale, unrunde WAIS -Einstechdrehen erfolgreich zur Erzeugung eines kraftübertragenden Wellenendes eingesetzt werden. Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass

- die WAIS-Einstechbearbeitung zur Erzeugung von Wellen mit kraftübertragenden Wellenabsätzen durch Unrunddrehen eingesetzt werden kann,
- die Strahlaufweitung und die Kontaktzeit zwischen Wasserstrahl und Werkstück die erreichbaren Formgenauigkeiten beim unrundem WAIS-E beeinflussen und, dass
- das Maschinensystem und damit verbundene Beschleunigungseffekte die maximal erreichbaren Genauigkeiten begrenzen können.

Referenzen:

- [1] J. Zeng, T. J. Kim, *Parameter prediction and cost analysis in abrasive water jet cutting operations*. Proceedings of the 7th American Waterjet Conference, 1993.
- [2] D. A. Axinte et. al., *Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 49, 2009.
- [3] G. Pozzetti, B. Peters, *A numerical approach for the evaluation of particle-induced erosion in an abrasive waterjet focusing tube*. Powder Technology 333, 2018.
- [4] M. Putz et. al., *High Precision Machining of Hybrid Layer Composites by Abrasive Waterjet Cutting*. Procedia Manufacturing 21, 2018.
- [5] A. Suárez et. al., *Surface integrity and fatigue of non-conventional machined Alloy 718*. Journal of Manufacturing Processes 48, 2019.
- [6] K. Weinert et. al., *Machining of High Strength Light Weight Alloys for Engine Applications*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56, 2007.
- [7] M. Hashish, *A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets*. Journal of Engineering Materials Technology 1984, 1984.
- [8] H. van Bui et. al., *Adaptive speed control for waterjet milling in pocket corners*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 103, 2019.
- [9] P. Miles, A. Henning, *Deep pocket milling with abrasive waterjets*. Cranfield: BHR Group, 2016.
- [10] F. Klocke et. al., *Technological and Economical Assessment of Alternative Process Chains for Blisk Manufacture*. Procedia CIRP 35, 2015.
- [11] M. Hashish, *Macro characteristics of AWJ turned surfaces*. Proceedings of the 2001 WJTA American Waterjet Conference, 2001.
- [12] A. I. Ansari, *A Study on Turning with Abrasive Waterjets*. Dissertation Houghton, Vereinigte Staaten: Michigan Technological University, 1990.
- [13] G. Fowler et. al., *Abrasive water-jet controlled depth milling of Ti6Al4V alloy - an investigation of the role of jet-workpiece traverse speed and abrasive grit size on the characteristics of the milled material*. Journal of Materials Processing Technology 161, 2005.
- [14] M. Hashish, *AWJ Milling of Gamma Titanium Aluminide*. Journal of Manufacturing Science and Engineering 132, 2010.
- [15] E. Uhlmann et. al., *Abrasive Waterjet Turning of High Performance Materials*. Procedia CIRP 1, 2012.
- [16] A. H. Laurinat, *Abtragen mit Wasserabrasivinjektorstrahlen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
- [17] F. Faltin, *Endkonturnahe Schrubbearbeitung von Titanaluminid mittels Wasserabrasivstrahlen mit kontrollierter Schnitttiefe*. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2018.
- [18] E. Uhlmann et. al., *Case study on possible productivity improvements of waterjet turning operations*. Proceedings of the 2017 WJTA American Waterjet Conference, 2017.
- [19] DIN 32711-1 (03.2009), *Welle-Nabe-Verbindung - Polygonprofil P3G - Teil 1: Allgemeines und Geometrie*. Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- [20] F. Klocke et. al., *Material Removal Simulation for Abrasive Water Jet Milling*. Procedia CIRP 68, 2018.



Constantin Männel, M. Sc.

Constantin Männel, M. Sc., geb. 1989, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Berlin. Seit 2016 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik im Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin.
Kontakt: maennel@iwf.tu-berlin.de



Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, geb. 1958, ist Leiter des Fachgebiets Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin sowie Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) im Produktionstechnischen Zentrum Berlin.
Kontakt: uhlmann@iwf.tu-berlin.de

3-D-Bearbeitung beim Wasserabrasivstrahl- schneiden

Entwicklung eines neuartigen Assistenz- und Überwachungssystems

Um die Erkennung der Bauteillage im Arbeitsraum einer Wasserstrahlschneidanlage zu automatisieren und den Maschinenbediener beim Einspannen und Positionieren des Werkstücks, sowie regelmäßigen Wartungsaufgaben zu unterstützen, haben die Wissenschaftler der Technischen Universität Chemnitz in Zusammenarbeit mit der Firma STM Waterjet GmbH Germany ein neuartiges, auf Augmented Reality basierendes, Assistenz- und Überwachungssystem zur präzisen 3D-Bearbeitung erstmalig umgesetzt.

Fortschritte im Flugzeug- und Automobilbau fordern die Anwendung von Leichtbaustrukturen, die gute thermische und mechanische Eigenschaften aufweisen. Bei der Herstellung solcher neuartiger Bauteile aus Verbund- und faserverstärkten Werkstoffen sowie Mischbauweisen werden Herausforderungen in der fertigungstechnischen Umsetzung komplexer Strukturen benannt [1]. Zur spanenden Bearbeitung dieser Bauteilgruppen soll ein wirtschaftliches Verfahren angewendet werden, das die verschiedenen Strukturen in einem Prozess trennen sowie Flexibilität hinsichtlich der Formgestaltung anbieten kann. Die Anwendung von Trennverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide zur Bearbeitung dieser schwer zerspanbaren anisotropen Materialien wird von den Werkstoffeigenschaften der Bauteile beschränkt, sowie der Tatsache, dass die finale Bauteilform meistens nicht mit nur einem

Werkzeug zu erzielen ist. Das Wasserabrasivstrahlschneiden als ein kalttrennendes Strahlverfahren bietet mehrfache Vorteile gegenüber diesen konventionellen Fertigungstechnologien.

Die räumliche 3-D-Bearbeitung von komplexen Bauteilgeometrien mittels 5-Achs-Wasserabrasivstrahlschneiden ist jedoch durch große technische Herausforderungen beim Positionieren, Stützen und Einspannen eingeschränkt. Solche Werkstücke haben meistens komplexe Stützflächen und unregelmäßige Formen, weswegen diese Prozessschritte bei Anwendung von klassischen Auflagestrukturen einer Wasserstrahlschneidanlage stark eingeschränkt sind. Die Fehler in dieser Aufbereitungsphase wirken sich auf die Genauigkeit der Bestimmung des Werkstückkoordinatensystems aus, was zu unpräzisen Schnitten in Bezug auf wichtige Merkmale des Bauteils oder zu einem Trennen mit

ungleichmäßigem Abstand des Fokussierrohrs zum Werkstück führen kann.

Flexibles Spannsystem für komplexe Bauteilgeometrien

Hinsichtlich der Einbringung und Befestigung von Spannvorrichtungen für 3-D-Bauteile bieten die bisher eingesetzten Gitter und Schwerlastauflagen mit Lamellen auf Wasserstrahlschneidanlagen ungenügende Genauigkeit und Flexibilität. Zusätzlich weisen diese Strukturen einen gewissen Abnutzungsgrad auf, weswegen der Schwerpunkt bei deren Herstellung auf den einfachen und kostengünstigen Austausch gelegt ist. Um die Voraussetzungen zum Positionieren und Einspannen komplexer räumlicher Bauteile zu erfüllen, ist eine neuartige einstellbare Auflageplattform mit flexiblem Spannmittel entwickelt worden [2]. Dieses flexible Spannsystem, das erstmalig an der STM PremiumCut 3-D Wasserstrahlschneidanlage aufgebaut worden ist (siehe Abbildung 1), erweitert die Auflage- und Spannmöglichkeiten an der Anlage und ermöglicht den Aufbau von standardisierten sowie bauteilspezifischen Spannvorrichtungen.

Die Erkennung der Bauteillage im Arbeitsraum, bzw. das Bestimmen des Werkstückkoordinatensystems ist von hoher Bedeutung für das eigentliche Ergebnis der 3-D-Bearbeitung. Ein ungenau definiertes Koordinatensystem kann zu einer Vielzahl an Prozessfehlern führen, wie z. B. einer fehlerhaften Werkzeugbahn,

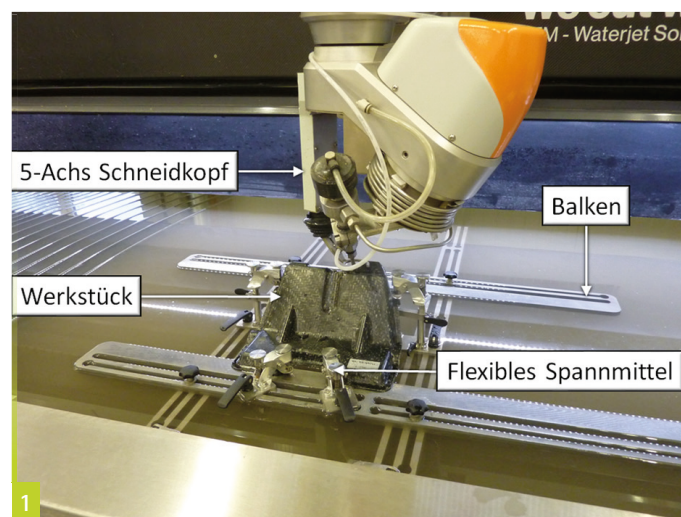
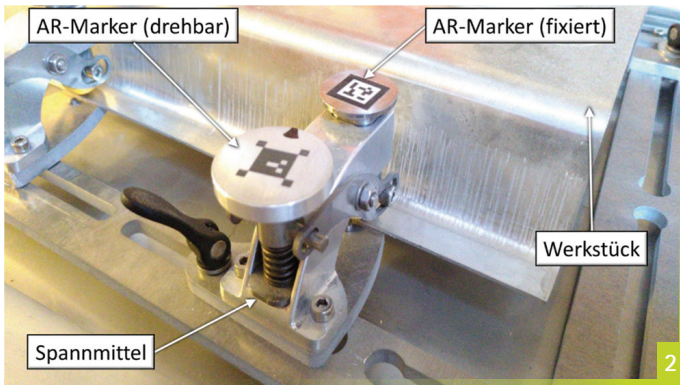


Abbildung 1
Umsetzung der flexiblen Auflagestruktur
auf der STM PremiumCut 3D Wasser-
strahlschneidanlage



Lasergravieren. Somit wird eine Robustheit gegenüber den rauen Bedingungen im Arbeitsraum der Wasserabrasivstrahlanlage, sowie eine hohe Genauigkeit hinsichtlich der Position der Marker in Bezug auf die Funktionselemente der Spannvorrichtungen gewährleistet.

Abbildung 2
Spannmittel mit aufgebrachtem Referenzmarkern: Ein Marker ist fixiert, der andere auf einem drehbaren Zylinder aufgebracht

Bei dem eigentlichen Einrichten der Auflagebalken im Arbeitsraum und der Einbringung der Spannvorrichtungen zum Stützen und Einspannen des Werkstücks wird mit einem am Schneidkopf integrierten Laserpointer dem Maschinenbediener die grobe Position dieser Elemente im Arbeitsraum vorgezeigt. Dieses Bestimmen der groben Position und Orientierung des Bauteils dient als Basis für das präzise Erfassen der Bauteillage und Bestimmen des Werkstückkoordinatensystems. So werden dem Kamerasystem im Voraus die NC-Koordinaten der ungefähren Lage der Spannvorrichtungen bereitgestellt, um somit die Suche nach den präzisen Werten zu vereinfachen.

Optisches Erfassen der Spannvorrichtungen

Die Erfassung der Marker erfolgt unter Einsatz des Industriekamerasystems CV-X320F und der SW-Kamera CA-H200M des Herstellers Keyence. Die Kamera ist am Maschinenkopf der Anlage angebracht und ist senkrecht nach unten auf die XY-Ebene des Arbeitsraumes ausgerichtet.

ungleichmäßigem Werkzeugabstand, Kollision des Werkzeugs mit dem Werkstück oder mit Spannvorrichtungen usw. Um das Definieren des Werkstückkoordinatensystems zu automatisieren und den Maschinenbediener bei diesem Prozessschritt zu unterstützen, wurde weiterhin ein neuartiges Assistenz- und Überwachungssystem entwickelt, dessen Ziel die Unterstützung des Maschinenbedieners bei der Werkstückpositionierung und dem damit verbundenen Einsatz von Spannvorrichtungen, der Definierung des Werkstückkoordinatensystems, sowie bei Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben mit Hilfe der Augmented Reality ist.

Werkstückgeometrie und Erstellung der NC-Bahn erfolgen, sondern auch die Position und Geometrie der eingesetzten Spannvorrichtungen definiert werden. Diese Voraussetzung hilft nicht nur bei der Planung des Aufbaus im Arbeitsraum der Maschine, sondern ermöglicht auch eine Nachprüfung eventueller Kollisionsmöglichkeiten des Schneidkopfes mit den angewandten Spannvorrichtungen.

Die Erkennung der genauen Position des Bauteils und somit die Lagebestimmung des Werkstückkoordinatensystems erfolgt indirekt über die optische Erkennung der Spannvorrichtungen und -orientierung. Zu diesem Zweck wurde ein Kamerasystem am Schneidkopf integriert. Um die Erkennbarkeit der Spannvorrichtungen zu gewährleisten, wurden sie auf der oberen Oberfläche mit Referenzmarkern bezeichnet, wie in Abbildung 2 dargestellt. Das Aufbringen der Marker an die metallische Oberfläche der Spannvorrichtungen erfolgt mittels

In Vorbereitung auf den eigentlichen Schneidprozess soll das System den Maschinenbediener bei der Einstellung der Auflagestruktur und der Einbringung der Spannvorrichtungen unterstützen. Zu diesem Zweck soll bei der Prozessplanung im CAM-System nicht nur die Bestimmung der

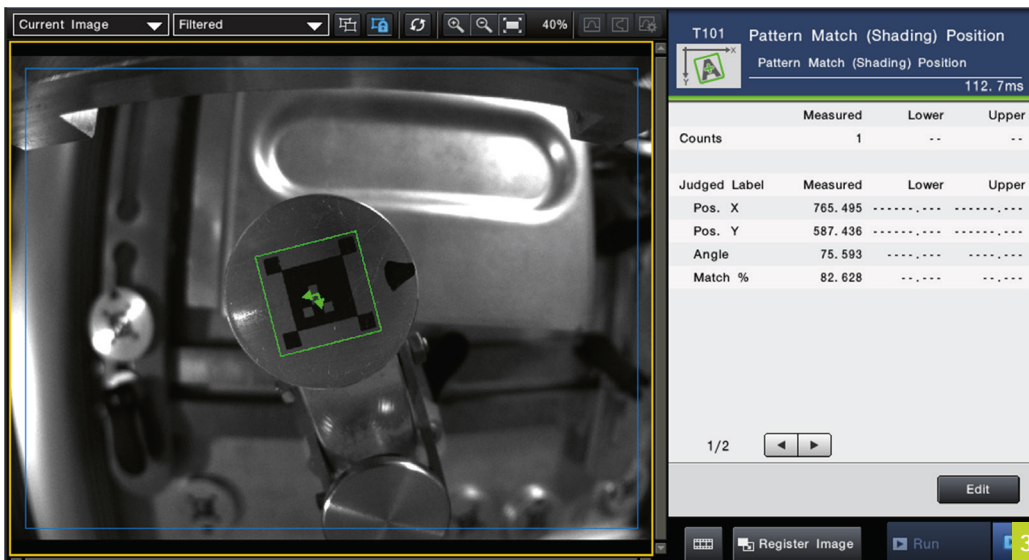
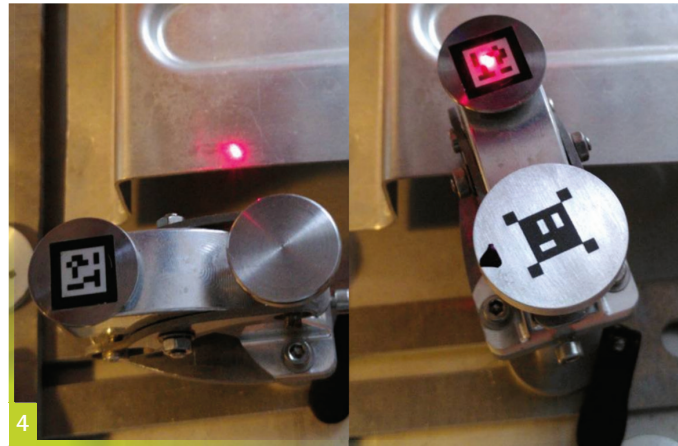


Abbildung 3
Erkennung des Referenzmarkers am Spannmittel

**Abbildung 4**

Projektive-AR mit Laserpointer welcher am Maschinenkopf angebracht wurde. Projektion auf Bauteil an Spannmittel-Soll-Position (links) und Projektion nach Anbringen eines Spannmittels (rechts)

Zur Erkennung der Referenzmarker (siehe Abbildung 3) wird das sukzessiv aufgezeichnete Bild durch eine Schwellwertanalyse gefiltert um im Anschluss ein Pattern Matching über das definierte Referenzmuster durchgeführt. Dabei werden Position und Orientierung des Markers innerhalb des Bildes festgestellt. Um die Position des Spannmittels im Koordinatensystem der Anlage abzuleiten, wird der Maschinenkopf solange verfahren, bis der Marker in der Bildmitte erkannt wird. Die Koordinaten können dann, unter Beachtung des Werkzeugoffsets der Kamera, aus der Anlagensteuerung ausgelesen werden.

Die Position eines Referenzmarkers kann mit einer Toleranz von unter 0,5 mm genau ermittelt werden. Jedoch sind die Abweichungen von bis zu 3 ° bei der Ermittlung der Orientierung erheblich und können zu Abweichungen von mehreren Millimetern bei der Ermittlung der Spannmittelposition führen. Um das Problem zu vermeiden, wurden auf dem Spannmittel zwei Referenzmarker angebracht. Dies ist in Abbildung 2 zu erkennen. Mit den Positionen der beiden Referenzmarker kann die Orientierung über die gesamte Länge des Spannmittels ermittelt werden. Damit geht eine wesentliche Erhöhung der Genauigkeit einher. Mit diesem Vorgehen zur Erkennung einzelner Spannmittelpositionen im Maschinenkoordinatensystem wurden zwei Vorgehen entwickelt um alle Spannmittel nacheinander automatisch zu erfassen. Im ersten

werden die zuvor im CAM-System festgelegten Spannmittelpositionen genutzt. Die Positionen werden nacheinander angefahren. Dabei verweilt der Maschinenkopf an jeder Position, bis der Anlagenbediener die Installation des Spannmittels bestätigt. Die Position kann durch das Livebild der Kamera geschätzt werden, indem das Spannmittel ungefähr in der Bildmitte installiert wird. Zusätzlich kann, wie in Abbildung 4 zu erkennen, auch ein neben der Kamera angebrachter Laserprojektor das Greifziel des Spannmittels auf dem Halbzeug augmentieren. Sind alle Spannmittel angebracht, fährt die Anlage alle Positionen erneut an und vermisst die Spannmittel wie zuvor beschrieben.

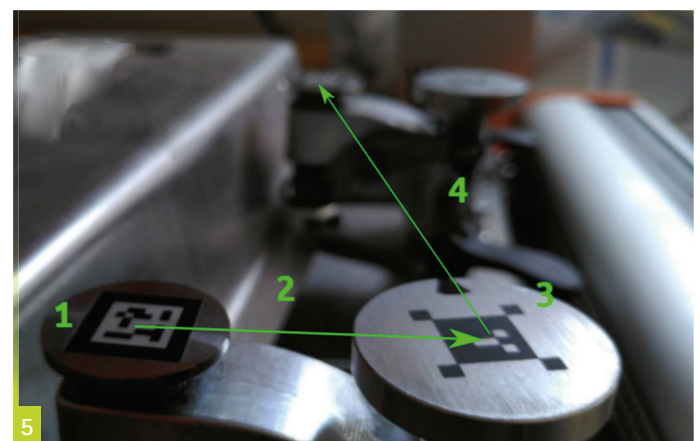
Bei der Zweiten Variante kodiert jedes Spannmittel über einen drehbaren Referenzmarker die Bewegungsrichtung zum nächsten Spannmittel. Das bedeutet, dass der Anlagenbediener nach Installation der Spannmittel, die drehbaren Marker so ausrichten muss, dass sie auf das jeweils

nächste Spannmittel zeigen. Sind alle Spannmittel ausgerichtet, verfährt der Bediener den Anlagenkopf so, dass ein beliebiges Spannmittel über den Referenzmarker erkannt wird. Danach läuft die Anlage automatisch: die Position und Lage des ersten Spannmittels wird ermittelt, die Richtung zum nächsten Spannmittel wird dekodiert, die Anlage fährt zum nächsten Spannmittel und wiederholt den Vorgang (s. Abbildung 5).

Augmented Reality für die Instandhaltung

Zur Verbesserung der Instandhaltung der Wasserstrahlschneidanlage wird die Augmented-Reality-Technologie (AR) eingesetzt. Über mobile Geräte, wie bspw. Tablets und AR-Brillen, werden Informationen über den Prozess direkt in das Sichtfeld des Nutzers auf die Anlage überblendet. Dabei werden sowohl Hinweise als Text als auch Markierungen mittels 3-D-Modellen genutzt. Manuelle Arbeiten des Instandhalters werden dadurch über eine erweiterte Mensch-Maschine-Schnittstelle unterstützt. Komplexe Prozesse können nutzerfreundlich visualisiert und Fehler vermieden werden.

Der Einsatz der AR-Anwendung wird im Projekt am Beispiel des Austauschs einer Wasserdüse gezeigt. Dabei spielen Sicherheitsaspekte und das genaue Einsetzen der Wasserdüse eine wichtige Rolle. Der Instandhalter wird dazu visuell unterstützt, um mögliche Fehler bei der Montage zu vermeiden. Der Einsatz der AR-Technologie erfolgt

**Abbildung 5**

Zweite Variante des Spannmittelfindens: 1) Marker vermessen; 2) Bewegung zu drehbarem Marker; 3) Dekodierung der Richtung; 4) Bewegung zum nächsten Marker

bereits in vielen Bereichen der Produktion, bspw. zur Visualisierung und Unterstützung von Montageprozessen, Wartungsarbeiten und dem Training neuer Prozesse [3] [4]. Dabei müssen die AR-Anwendungen speziell an die Anforderungen des konkreten Anwendungsfalls angepasst werden. Speziell die Integration der benötigten Daten und Systeme, das genaue Erkennen der Anlage (Tracking) und die Auswahl des AR-Geräts stellen eine Herausforderung dar.

Das Ziel der AR-Anwendung zum Austausch der Wasserdüse ist die nutzerfreundliche Visualisierung der einzelnen Arbeitsschritte, um diese korrekt durchzuführen und keinen wichtigen Arbeitspunkt auszulassen. Als Ausgangspunkt dient die technische Dokumentation, die in Papierform oder als elektronisches Dokument vorliegt. Diese muss speziell für den AR-Anwendungsfall angepasst und integriert werden, um eine intuitive und nutzerfreundliche Anleitung zu ermöglichen. Zur Umsetzung der AR-Anwendung für die Instandhaltung werden zunächst die darzustellenden Prozesse sowie die dazu benötigten Daten und Systeme analysiert, um eine bestmögliche Visualisierung zu erreichen und alle notwendigen Informationen zu integrieren. Für das Beispiel des Austauschs der Wasserdüse wurden dafür alle einzelnen Schritte in strukturierter Form mittels einer Excel-Tabelle aufbereitet und erweiterte Informationen, wie bspw. Hinweistexte, Bilder und 3-D-Modelle, zugeordnet. Die Nutzung spezieller Dokumentations- oder PDM-Systeme ist ebenso möglich.

Das erstellte Konzept besteht in der schrittweisen Anzeige der Prozessinformationen mittels der aufbereiteten Dokumentation zur Unterstützung des Instandhalters. Im Gegensatz zur Papierdokumentation werden wichtige Informationen passend zum aktuellen Arbeitsschritt direkt angezeigt und weiterführende Informationen können schnell abgerufen werden. Dabei werden nicht nur Texte genutzt, sondern

3-D-Modelle für ein besseres Verständnis direkt auf die Anlage überblendet. Die Umsetzung der AR-Anwendung erfolgte mit der von der Professur Produktionssysteme und -prozesse der TU Chemnitz entwickelten Software ARViewer [5] [6]. Diese wurde zur Erstellung verschiedener, individuell gestalteter Anwendungsfälle im Produktionsumfeld entworfen. Durch den modularen Aufbau können bspw. verschiedene Datenquellen, individuelle (3-D-)Visualisierungen, Tracking-

der erstellten Excel-Tabelle geladen und die Visualisierung wird automatisch daran angepasst. Dadurch ist auch eine Änderung und Erweiterung der Instandhaltungsunterstützung leicht möglich. Die 3-D-Modelle werden dazu direkt aus der CAD-Anwendung exportiert. Zum Tracking der Anlage für die 3-D-Überblendung wurde zu Testzwecken eine große Markierung an der Anlage angebracht, diese kann jedoch für den realen Betrieb, ähnlich der Spannmittel, besser in die Anlage



Abbildung 6
AR-Anwendung auf einem Tablet zum Austausch der Wasserdüse mittels ARViewer [5] [6]

Verfahren und AR-Geräte genutzt werden.

Abbildung 6 zeigt die erstellte AR-Anwendung zum Austausch der Wasserdüse auf einem Tablet. Auf der rechten Seite des Bildes befindet sich ein Informationsfeld, indem Schritt für Schritt Hinweise sowie Bilder für die erforderlichen Arbeiten dargestellt werden. Im Kamerabild werden zudem in der Mitte des Bildes die einzelnen Komponenten des Wasserabrasivinjektorstrahl-schneidkopfes farblich über die Anlage überblendet und können zum verbesserten Verständnis mit Animationen hervorgehoben werden. Zudem können in der Anwendung weitere Informationen über die Anlage und die Prozesse sowie weitere (3-D-) Ansichten der Anlage aufgerufen werden.

Die erforderlichen Instandhaltungsdaten werden beim Start der AR-Anwendung aus

integriert werden. Als AR-Gerät wurde ein Tablet gewählt, um viele und komplexe Informationen und Dokumente anzeigen zu können. Für die Durchführung der Arbeiten kann das Tablet mit Standbild auch neben die Anlage gestellt werden.

Durch die Umsetzung einer AR-Anwendung konnte eine Unterstützung der Instandhaltung für eine Wasserstrahlschneidanlage geschaffen werden. Diese ermöglicht eine schnelle und intuitive Hilfestellung für den Instandhalter. Eine Erweiterung der AR-Anwendung ist die Anbindung weiterer Systeme, um Live-Daten bspw. aus dem MES oder der CNC zu integrieren, wie es bereits in weiteren Projekten umgesetzt wurde [5] [6]. Dadurch können bspw. ein Monitoring und eine Fehlerdiagnose durchgeführt und entsprechende Handlungsanweisungen automatisch bereitgestellt werden.

Zusammenfassung

Durch die Anwendung von Augmented Reality können die Herausforderungen der 3-D-Bearbeitung gelöst und der Bediener bei alltäglichen Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben unterstützt werden. Diese Vorteile ermöglichen die Verkürzung der Zeit, die für das Aufbereiten des Prozesses benötigt wird. Die Automatisierung des Verfahrens zur Bestimmung des Werkstückkoordinatensystems führt nicht nur zu einer Produktivitätserhöhung, sondern erhöht die allgemeine Prozesssicherheit und -genauigkeit. Es bestehen jedoch Herausforderungen hinsichtlich der Übereinstimmung des realen Bauteils mit seinem entsprechenden virtuellen Modell, bzw. der CAD-Datei. Diese Unterschiede können während der Bearbeitung zu ungleichmäßigem Düsenabstand führen, auch wenn der Werkstücknullpunkt präzise definiert werden kann. Zukünftig sollen Lösungen zu dieser Problematik erforscht werden, um gleichmäßige Schnitteigenschaften und Oberflächenqualität während der gesamten Bearbeitung sicherzustellen. Um die Prozesssicherheit zu gewährleisten, muss die Instandhaltung fachgerecht durchgeführt werden. Mithilfe der entwickelten Augmented-Reality-Anwendung wird der Bediener bei alltäglichen Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben unterstützt. Die intuitive Visualisierung kann Positionier- und Handlungsfehler reduzieren.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Referenzen:

- [1] R. Heuss et al., *Lightweight, heavy impact - How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive*. McKinsey&Company, 2012.
- [2] N. Redžić et al., *Development of an Assistance and Control System for Waterjet Cutting of Free-Form Workpieces*. Klichová D., Sitek L., Hloch S., Valentinčič J. (eds) *Advances in Water Jetting*. Springer, Cham., 2021.
- [3] G. Caiza et al., *Industrial training platform using augmented reality for instrumentation commissioning*. *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*, Springer, Cham, pp. 268-283, 2020.
- [4] M. M. L. Chang et al., *AR-guided product disassembly for maintenance and remanufacturing*. *Procedia CIRP*, Vol. 61, pp. 299-304, 2017.
- [5] T. Wittkopp et al., *Fit für Industrie 4.0 - Durchgängiges Engineering und Augmented Reality am Beispiel einer Industrieanwendung*. *VAR2 2015 - Realität erweitern*, 3. Fachkonferenz zu VR/AR-Technologien in Anwendung und Forschung an der Professur für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz, pp. 121-132, 2015.
- [6] C. Kollatsch und P. Klimant, *Efficient integration process of production data into Augmented Reality based maintenance of machine tools*. *Production Engineering - Research and Development*, Vol. 15, No. 3, pp. 311-319, 2021.

**Nermin Redžić, M. Sc.**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Produktionssysteme und -prozesse in der Abteilung Werkzeugmaschinen und spanende Fertigungstechnologien an der Technischen Universität Chemnitz; Forschung im Bereich der Wasserabstrahltechnologie mit dem aktuellen Schwerpunkt der 3D-Wasserstrahlbearbeitung.
Kontakt: nermin.redzic@mb.tu-chemnitz.de

**Dipl.-Inf. Felix Pfeiffer**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Produktionssysteme und -prozesse in der Abteilung Prozessinformatik und Virtuelle Produktentwicklung an der Technischen Universität Chemnitz; Forschung im Bereich der Künstlichen Intelligenz und Bildanalyse in der Produktion und im Maschinenbau.
Kontakt: felix.pfeiffer@mb.tu-chemnitz.de

**Christian Kollatsch, M. Sc.**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Produktionssysteme und -prozesse in der Abteilung Prozessinformatik und Virtuelle Produktentwicklung an der Technischen Universität Chemnitz; Forschung im Bereich Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) in der Produktion und dem Maschinenbau.
Kontakt: christian.kollatsch@mb.tu-chemnitz.de

**Dipl.-Ing. (FH) Sven Anders**

Geschäftsführer der Firma STM Waterjet GmbH Germany.
Kontakt: s.anders@stm-waterjet.com

**Prof. Dr.-Ing. Martin Dix**

Professor an der Professur Produktionssysteme und -prozesse an der Technischen Universität Chemnitz und Institutsleiter am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU).
Kontakt: martin.dix@mb.tu-chemnitz.de

Kosteneffiziente Bearbeitung von 3-D-Bauteilen durch ein neuartiges Wasserstrahlkonzept

Kompensation von Konturverletzungen

Der Wasserstrahl ist ein flexibles Werkzeug, das ständig seine Form und Wirkung ändert und seine kinetische Energie verliert [1], was zu Konturverletzungen wie Riefen und Schnittwinkel im Werkstück führt [2,3]. Daher ist eine dynamische Prozesssteuerung zur Kompensation von Konturverletzungen erforderlich, die die notwendigen Anpassungen der Werkzeugbahn und der Parameterwahl bei der Wasserstrahlbearbeitung vornimmt.

Der erste Schritt für eine kostengünstige Kompensation der Konturverletzungen ist die Modellierung der Wasserstrahlform, die als Grundlage für die Simulation und Kompensation der Konturverletzungen bei der 3-D-Wasserstrahlbearbeitung verwendet werden kann. Viele der vorhandenen Modelle stellen begrenzte Lösungen dar und sind oft durch eine Vielzahl unbekannter Variablen gekennzeichnet. Für industrielle Anwendungen darf ein solches Modell nur einen minimalen Satz von Parametern verwenden, deren Werte leicht zu erreichen sind. Henning [4] hat ein Modell entwickelt, bei dem die Strahlgeometrie die geometrischen Eigenschaften des Werkstücks einschließlich der Konturverletzungen bestimmt. Er hat gezeigt, dass das Modell zur Wasserstrahlkompensation innerhalb von Computer Aided Manufacturing (CAM)-Software verwendet werden kann. Um dieses Modell nutzen zu können, ist jedoch eine Datenbank für jedes Material erforderlich. Das bedeutet, dass für Materialien ohne vorhandene Datenbank die

im Modell verwendete Methode zur Bestimmung der Modellparameter aufwendig ist. In dieser Arbeit wird das Modell von Henning mit Modifikationen in der Methode zur Bestimmung der Modellparameter verwendet. Es wurde erfolgreich bestätigt, dass die Werte der notwendigen Modellparameter mit relativ geringem Aufwand und den in einer industriellen Produktionsumgebung verfügbaren Mitteln ermittelt werden können. In einem weiteren Schritt wurde ein dynamischeres Kompensationsverfahren mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten getestet. Dazu wurde nach dem Hennings Modell die zu erwartende Konturverletzungen berechnet und der maximale Vorschub für eine gegebene Fertigungstoleranz ermittelt.

Wie in Abb. 1 gezeigt, wurde die Strahlgeometrie als Zylinder mit erwarteten Radien und Schnittwinkeln von der idealen vertikalen Schnittkante modelliert. Es kann eine Krümmung der Strahlfront gegen die Vorschubrichtung angenommen werden,

was bedeutet, dass sich der tiefenabhängige Strahlnachlauf entlang der jeweiligen Tangente bewegt. Der Strahlnachlauf allein bewirkt eine Änderung des Radius der Schneidkante, wie in Abb. 1 dargestellt. Die Änderung des effektiven Strahlradius beeinflusst zusätzlich den Radius der Schneidkante. Mit der Festlegung der Randbedingungen für den kreisförmigen Strahlquerschnitt und der Definition des Strahlnachlaufs entgegen der Vorschubrichtung sind die wichtigsten Elemente für die Strahleigenschaften definiert. Der Strahl besteht also aus einem Zylinder, dessen Mittelpunkt $s(h)$ und Durchmesser $D(h)$ über die Schnitttiefe variieren.

Die Vorschubgeschwindigkeit, die während der Bearbeitung direkt über die CNC variiert werden kann, ist der größte Einflussfaktor auf die geometrischen Eigenschaften des Modells. Außerdem spielt der Fokussierrohr-Durchmesser eine erhebliche Rolle bei der Bestimmung der Strahlgeometrie. Das erreichte Modell ist also eine Funktion der

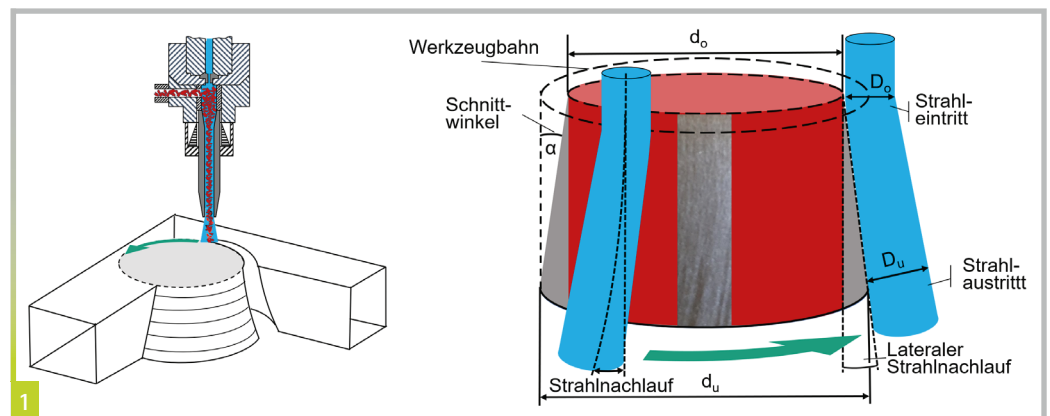


Abbildung 1
Wasserstrahl als Zylinder mit Radien und Schnittwinkel [4].

Vorschubgeschwindigkeit v und des Fokussierrohr-Durchmessers d_f . Darüber hinaus können die Werkstoffeigenschaften des Werkstücks wie Härte, E-Modul, Duktilität und Brucharbeit die Strahlgeometrie beeinflussen, die in den f_i -Faktoren des Modells berücksichtigt werden. Die Strahlgeometrie ist jedoch unabhängig vom Werkstückdurchmesser und der Krümmung der Bahn im Modell von Henning.

$$D_o = f_1 \times d_f \times v^{f_2} \quad (1)$$

$$D_u = f_3 \times d_f \times v^{f_4} \quad (2)$$

$$s_v = v \times f_5 \quad (3)$$

Das geometrische Modell für den Durchmesser und die Zentrumsabweichung des Strahls kann somit wie in den Gleichungen (4) und (5) entwickelt werden. In diesen Gleichungen stellt h die Schnitttiefe dar, die an der Oberseite des Werkstücks (Strahleneintritt) gleich Null ist und an der Unterseite des Werkstücks (Strahlaustritt) gleich h_{max} ist. Es ist zu erwähnen, dass h_{max} die maximale Schnitttiefe ist, die gleich der Werkstückdicke ist.

$$D(h) = d_f \times (f_1 \times v^{f_2} (1-h/h_{max}) + f_3 \times v^{f_4} h/h_{max}) \quad (4)$$

$$s(h) = v \times f_5 \times (h/h_{max})^2 \quad (5)$$

Der Schnittwinkel α des Werkstücks ist abhängig von dem Unterschied zwischen dem Oberseitendurchmesser d_o und dem Unterseitendurchmesser d_u . Mit Hilfe des Pythagoras-Satzes, wie in Abb. 2 gezeigt, kann der Schnittwinkel gemessen werden.

$$\alpha = \tan^{-1} ((d_u - d_o) / (2 \times h_{max}))^{-1} \quad (6)$$

Variation des Maschinenkopfwinkels

Die Wechselwirkung des Wasserstrahls mit dem Werkstück wurde bei der Bahnplanung in diesem Modell berücksichtigt. Durch dynamisches Neigen des Schneidkopfes mit einem Kompensationswinkel, der gleich dem Schnittwinkel ist (Abb. 2), ergibt sich eine Strahlabweichung längs zur Werkstückoberfläche [5] und folglich können Riefen und Schnittwinkel reduziert werden [6,7]. Der Kompensationswinkel kann jedoch durch die gleichzei-

tige Verwendung der Strahlnachlaufkompensation beeinflusst werden.

Variation der Vorschubgeschwindigkeit

Die bisher beschriebene Form der Strahlkompensation hat den Nachteil, dass sie bei komplexen Geometrien die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit be-

den kann. Nach diesem Modell bildet sich die Schnittkerbe entgegen der Vorschubrichtung aus. Der Strahlaustrittspunkt läuft nach Gleichung (3) dem Strahleintrittspunkt um $v \times f_5$ mm nach. Durch eine Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit wird der Strahlnachlauf kleiner, das Ergebnis wird genauer. Es wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Vorschubgeschwindigkeit

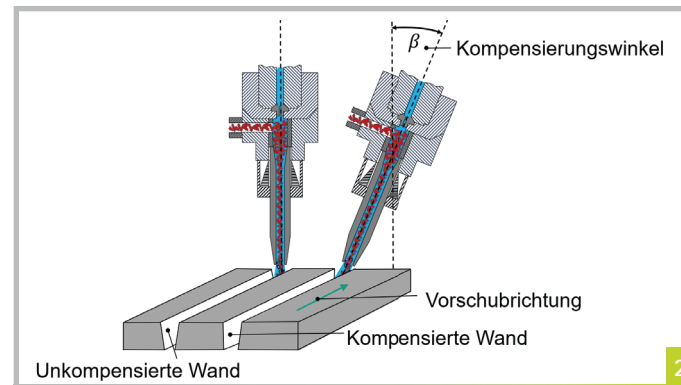


Abbildung 2 Schneidkopf mit geneigtem Winkel [8]

schränkt. Um den Strahlnachlauf zu kompensieren, muss bei der bisher beschriebenen Kompensationsmethode der Wasserstrahl in Bewegungsrichtung orientiert werden (Abb. 3.a). Je höher die Vorschubgeschwindigkeit, desto stärker muss der Strahl gekippt werden. Ändert sich die Vorschubrichtung sehr schnell, muss der Strahl auf kurzer Strecke umorientiert werden. Dies überfordert die Kinematik der Wasserstrahlmaschine, es kommt zu einem Vorschubgeschwindigkeitseinbruch und damit zu Konturverletzungen. Es wurde daher nach einer Methode gesucht, hohe Geschwindigkeiten mit einer Strahlkompensation zu kombinieren. Das Optimierungsziel waren möglichst hohe Bahngeschwindigkeiten bei möglichst geringen Kompensationswinkeln des Wasserstrahls.

Beim Wasserstrahlschneiden muss ein Kompromiss zwischen Geschwindigkeit und Genauigkeit getroffen werden. Um für jeden Punkt der zu schneidenden Kontur eine optimale Geschwindigkeit zu finden, wurde nach Hennings Modell bestimmt, welche Geschwindigkeit bei vorgegebener Konturverletzung erreicht wer-

so anpasst, dass die durch den Strahlnachlauf verursachte Konturverletzungen konstant bleibt. (Abb. 3.b).

Experimentelle Untersuchungen

Zur Bewertung der Parameter des Modells wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Ergebnisse vor und nach den Konturenkompensationen zu vergleichen. Zunächst wurden die Riefen und der Schnittwinkel für eine einfache Geometrie, d. h. einen Zylinder, durch Winkel- und Vorschubkompensationen reduziert. Zweitens wurden die erzielten Ergebnisse aus dem ersten Schritt für die Optimierung einer anspruchsvollen Geometrie, d. h. einer Zahnradgeometrie, verwendet, um zu zeigen, dass das verbesserte Modell für eine breite Anzahl von komplexen Anwendungen von Vorteil ist. Schließlich wurden zur dynamischeren Kompensation Versuche mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten für die gleiche anspruchsvolle Geometrie (Zahnrad) durchgeführt.

Die Experimente wurden auf einer H.G. Ridder 5-Achsen-Wasserstrahlmaschine des Typs

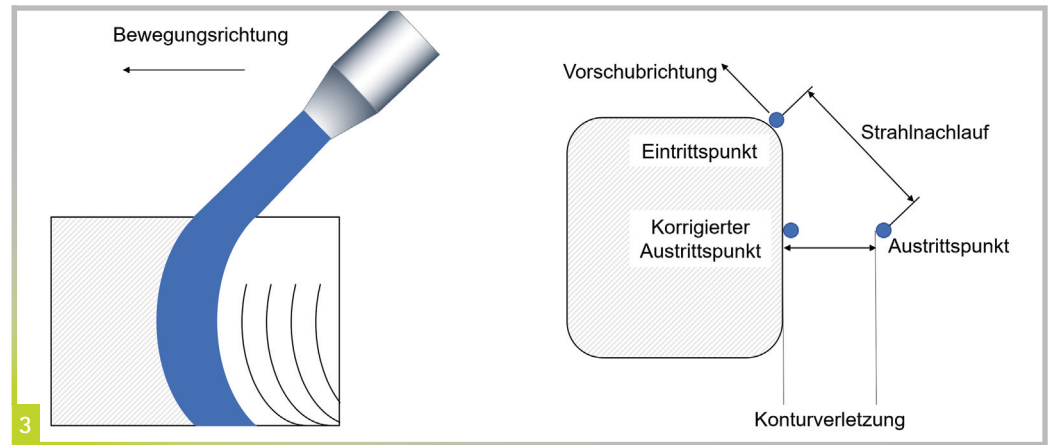


Abbildung 3
Kompensation des Strahlnachlaufs (a) links und (b) rechts

HWE-P2030 unter Verwendung einer UHDE 45 KW-Übersetzerpumpe mit einem Druck von bis zu 6000 bar durchgeführt. Der Wasserstrahlkopf ist mit einer Kompensationsfunktion des kleinsten programmierbaren Winkels von 0,01° ausgestattet. Der Abstand zwischen Wasserstrahlaustritt und Werkstückoberfläche betrug 3 mm mit einem Abrasivmassenstrom von 200 g/min und einem Wasserdruck von 3500 bar. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde variiert, um ihren Einfluss auf das geometrische Modell zu untersuchen. Als Werkstückmaterial wurde Aluminium gewählt, da es ein typischer Werkstoff in der Industrie mit einem breiten Anwendungsspektrum ist. Seine Dicke wurde auf 20 mm festgelegt, um die erforderliche Mindestdicke für die Darstellung der Riefen- und Schnittwinkelbildungen zu haben.

Einfache geometrische Proben

Nach Hennings Modell spielt die Bahnkrümmung keine Rolle bei der Bestimmung der Modellparameter. Die Vorversuche in dieser Arbeit haben jedoch gezeigt, dass durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Bahnkrümmungen zuverlässigere Modellparameter in Bezug auf die Kompensation erreicht werden können. Dies liegt an der dynamischen Charakteristik des Strahls, insbesondere bei kleinen Krümmungen, die im Hennings Modell nicht berücksichtigt wurde. Daher wurden zylindrische Geometrien

mit unterschiedlichen Durchmesser von 18 mm bis 50 mm in Schritten von 2 mm mit drei verschiedenen Vorschubwerten von 60 mm/min, 120 mm/min und 180 mm/min geschnitten, um die Modellfaktoren empirisch zu erreichen. Es wurde bestätigt, dass die Formen der Zylinder (die Radien der Ober- und Unterseite der Zylinderflächen) mit einem einfachen Messschieber bestimmt werden können, was den Einsatz dieses Modells praktischer macht. Die Ergebnisse dieses einfachen Messgerätes boten die notwendige Genauigkeit, um die f_1 -Parameter des Wasserstrahlmodells zu berechnen.

Nach der Parameterbestimmung des Modells im ersten Schritt wurde das Optimierungsmodell zur Konturverletzungskompensation begutachtet. Daraufhin wurden die kleinsten Zylinder von 18 mm mit einer kompensierten Werkzeugbahn und den gleichen unterschiedlichen Vorschubwerten von 60 mm/min, 120 mm/min und 180 mm/min bearbeitet. Der Orientierungsvektor des Maschinenkopfes wurde durch Kompensationswerte bestimmt, die aus dem Wasserstrahlmodell abgeleitet wurden.

Komplexe geometrische Proben

In der zweiten Phase der experimentellen Untersuchung wurde eine Zahnradgeometrie als anspruchsvolle Geometrie betrachtet, da ihre geometrische Form Ecken und enge Radien

enthält. Basierend auf den Ergebnissen der zylindrischen Proben wurde das entwickelte Modell zur Kompensation eines Zahnrades für zwei Vorschubwerte von 20 mm/min und 40 mm/min eingesetzt. Abschließend wurden die kompensierten und unkomensierten Zahnräder verglichen, um das optimierte Modell zur Kompensation von Konturverletzungen in dieser Arbeit zu bewerten.

Im nächsten Schritt wurden Kompensationen mit Variation der Vorschubgeschwindigkeit getestet. Dabei wurde die Geschwindigkeit nach oben begrenzt, da sonst auf Geraden sehr hohe Werte erreicht werden. Als Toleranz wurde 0,33 mm gewählt, als Maximalgeschwindigkeit 40 mm/min. Die Werte wurden gewählt, um eine Vergleichbarkeit zu den bereits vorgestellten Versuchen herzustellen. Bei dieser Toleranz ergibt sich eine Mindestgeschwindigkeit von 20 mm/min. Es wurden vier verschiedene Kompensationsmethoden verwendet, um die Auswirkungen der dynamischen Kompensation mit Variationen der Geschwindigkeiten am Werkstück zu untersuchen.

Ergebnisse und Diskussionen

Diese Arbeit besteht aus einer zweistufigen Modellnutzung. In der ersten Phase wurden die Modellparameter durch das Schneiden von Zylindern von jeweils 18 mm bis 50 mm mit

Tabelle 1
Berechnung der f_i -Faktoren

f-Faktoren	f_1 [mm/min]	f_2	f_3 [mm/min]	f_4	f_5 [min]
	3,2	-0,018	17,1524	-0,435	0,0211

	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	60	120	180
d_t [mm]	unkompensiert	17,93	17,92	17,97
	kompensiert	18,01	18,02	17,98
d_u [mm]	unkompensiert	18,26	18,78	19,22
	kompensiert	18,19	18,23	18,34
$d_u - d_t$ [mm]	unkompensiert	0,33	0,86	1,25
	kompensiert	0,18	0,21	0,36
α [°]	unkompensiert	0,48	1,23	1,79
	kompensiert	0,25	0,30	0,51
s [mm]	unkompensiert	-	1,68	2,99
	kompensiert	-	0,27	0,72

Tabelle 2
Vergleich von unkompensierten und kompensierten Zylindern mit 18 mm Durchmesser

drei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten ermittelt. Dann wurde das Optimierungsmodell für diese einfachen Geometrien unter Verwendung der berechneten Modellparameter getestet. In der zweiten Phase wurde das Modell für anspruchsvollere geometrische Proben eingesetzt und die Ergebnisse vor und nach der Kompensation verglichen.

Ergebnisse der einfachen geometrischen Proben

Die Durchmesser aller zylindrischen Proben und ihrer geschnittenen Löcher wurden an der Ober- und Unterseite gemessen, um die f_r -Faktoren des Modells in Gleichungen (4) und (5) zu berechnen. Der Strahldurchmesser am Strahleintritt und -austritt wurde als Differenz zwischen diesen Werten berechnet. Dies wurde für alle Zylinder und Löcher durchgeführt, die mit drei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten von 60 mm/min, 120 mm/min und 180 mm/min geschnitten wurden. Es hat sich gezeigt, dass die Methode von Henning, den Strahlnachlauf aus den Düsen- und Zylinderdurchmessern zu berechnen, nicht anwendbar ist, da die Ergebnisse dazu neigen, bei minimalen Eingangsänderungen über einen großen Bereich zu variieren. Stattdessen wurde der Strahlnachlauf durch Messung der Riefen auf der Schnittfläche ermittelt. Die Modellparameter (Tabelle 1) wurden durch Vergleich der Messungen mit den berechneten Ergebnissen aus dem Modell für alle Zylinder und Lösung des resultierenden Optimierungsproblems berechnet.

Basierend auf diesen Faktoren wurden dann die kompensierten Zylinder mit 18 mm Durchmesser geschnitten und mit den Unkompensierten verglichen, wie in Abb. 4 und Tab. 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die höheren Vorschübe erwartungsgemäß zu einer geringeren Schnittqualität des Werkstücks führen. Außerdem zeigen die kompensierten Zylinder eine Verbesserung der Schnittqualität, denn die Unterseite der kompensierten Zylinder ist im Vergleich zu den unkompensierten Zylindern weniger stark von ihrer Oberseite abgewichen (Abb. 4 links). Es sollte erwähnt werden, dass zur

Vereinfachung des Messverfahrens die Kantenverrundung auf der Oberseite des kompensierten Zylinders nicht berücksichtigt wurde. Sie hat jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Berechnung der Modellparameter, da der wichtigste Modellparameter f_s von dieser Vereinfachung unabhängig ist. Zusätzlich ist die Riefenbildung bei den kompensierten Zylindern reduziert (Abb. 4 rechts).

Aufgrund der Strahlaufweitung ist der Zylinderradius auf der Unterseite größer als auf der Oberseite. Höhere Vorschubgeschwindigkeiten vergrößern

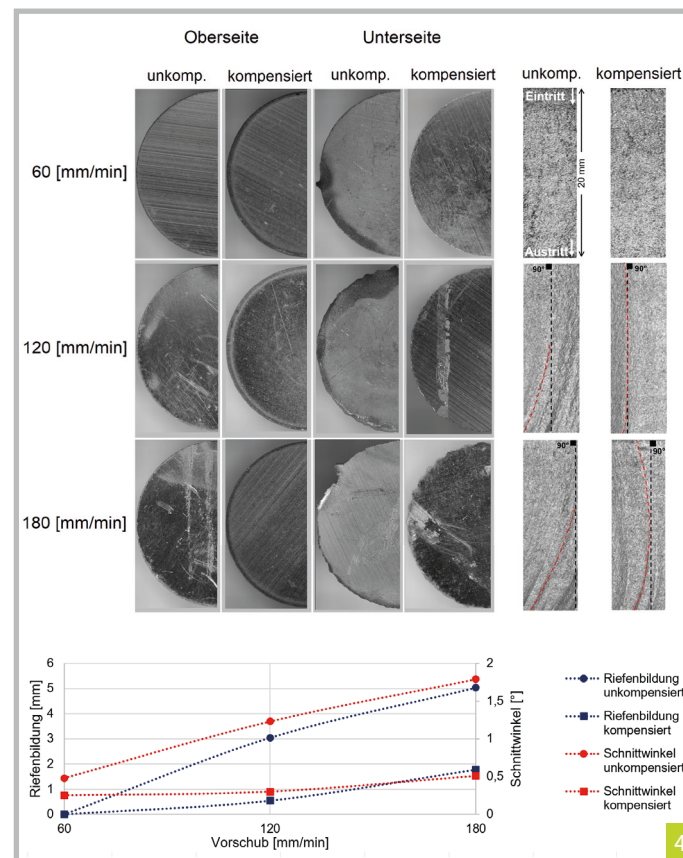


Abbildung 4
Vergleich von unkompensierten und kompensierten Zylindern mit 18 mm Durchmesser

nicht nur den Schnittwinkel, sondern erhöhen auch die Riefenbildung im Werkstück. Durch Kompensation wurden diese Konturverletzungen für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten reduziert. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 60 mm/min wurde der Schnittwinkel um 48 % reduziert und es konnten keine Riefenbildung bei der mikroskopischen Messung beobachtet werden. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 120 mm/min wurde der Schnittwinkel um 76 % und die Riefenbildung um 82 % reduziert. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 180 mm/min wurde der Schnittwinkel um 72 % und die Riefenbildung um 65 % reduziert. Um einen besseren Einblick in die Wirkung der Kompensation sowie der Prozessparameter zu erhalten, sind die Ergebnisse in Abb. 4 unten aufgetragen.

Ergebnisse der komplexen geometrischen Proben

Es wurden die Profile der Zahnräder vor und nach der Kompensation mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten von 20 mm/min und 40 mm/min gewonnen und verglichen. Die Konturen der Ober- und Unterseite, dargestellt in Abb.5, wurden mithilfe von ImageJ extrahiert und anschließend übereinandergelegt. In Abb. 5 ist zu erkennen, dass die geringere Vorschubgeschwindigkeit erwartungsgemäß zu einer besseren Schnittqualität führt. Darüber hinaus haben die kompensierten Zahnradgeometrien eine höhere Schnittqualität aufgrund größerer Ähnlichkeiten zwischen den Ober- und Unterseitenprofilen. Abb. 6 veranschaulicht auch die Verbesserung des Zahnrads nach der Kompen-

sation durch den Vergleich mit den Messergebnissen. Die Messungen der verschiedenen Teile der Zahnräder wurden mithilfe von Alicona durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede zwischen der Oberseite und der Unterseite der Zahnräder nach Verwendung des Kompensationsmodells reduziert werden. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/min wurden die Differenzen zwischen der Oberseite und der Unterseite der Zahnradbreite, der Kopfhöhe, der Fußhöhe und den Innenradien um 96 %, 25 %, 84 % bzw. 56 % reduziert. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 40 mm/min wurden die Differenzen zwischen der Oberseite und der Unterseite der Zahnradbreite, der Kopfhöhe, der Fußhöhe und den Innenradien um 90 %, 35 %, 77 % bzw. 60 % reduziert. Es kann also bestätigt werden, dass das Kompensationsmodell die Konturverletzungen einer komplexen 3-D-Geometrie reduziert hat.

Ergebnisse der komplexen geometrischen Proben mit der Variation der Vorschubgeschwindigkeit

Beim ersten Versuch für die dynamische Kompensation mit der Variation der Vorschubgeschwindigkeiten wurde noch keine Strahlkompensation genutzt. Es wurde lediglich die Vorschubgeschwindigkeit variiert (Abb. 7.a). Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, wurde nun die Strahlorientierung so geändert, dass der Strahlaustrittspunkt nach Hennings Modell auf dem kürzesten Weg auf die Bauteilkontur gezogen wird. Die Aufweitung des Wasserstrahls wurde berücksich-

tigt (Abb. 7.b). Im Gegensatz zur von Henning vorgeschlagenen Kompensationsmethode, bei der der Strahlaustrittspunkt unter den Strahleintrittspunkt gezogen wird, ist die resultierende Strahlorientierung geringer. Dies gilt insbesondere bei Konturen mit geringer Krümmung und bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten. Daher muss bei dieser Methode der Strahl bei Richtungsänderungen der Bewegungsbahn deutlich weniger umorientiert werden. Bei Ecken und engen Radien sinken so die dynamischen Anforderungen an die Wasserstrahlmaschine.

Man erkennt, dass die Ergebnisse schlechter sind als in den nach Hennings Methode kompensierten Werkstücken. Als ein möglicher Fehler wurde nun die Geschwindigkeit des Strahlaustrittspunktes identifiziert. Nach Gleichung (5) ist der Strahlnachlauf proportional zur Vorschubgeschwindigkeit. Dies führt zu der Situation, dass bei Beschleunigungsvorgängen der Strahlnachlauf weniger stark beschleunigt als der Strahleintritt. Bei Beschleunigungsvorgängen in Ecken führt die beschriebene Methode zu einem zeitweise unbeweglichem Strahlaustrittspunkt. Dies dürfte die Erklärung für die Konturverletzungen bei den konkaven Stellen der Bahnkontur sein. Um diesen Effekt abzuschwächen, wurde nun auch die Geschwindigkeit des Bahnaustrittspunktes berechnet. Die Strahlorientierung wurde so modifiziert, dass die Geschwindigkeit des Strahlaustrittspunktes an keinem Punkt 20 mm/min unterschreitet. Auch bei dieser Variante der Strahlsteuerung lag der berechnete Strahlaustrittspunkt auf der Bahnkontur. Die

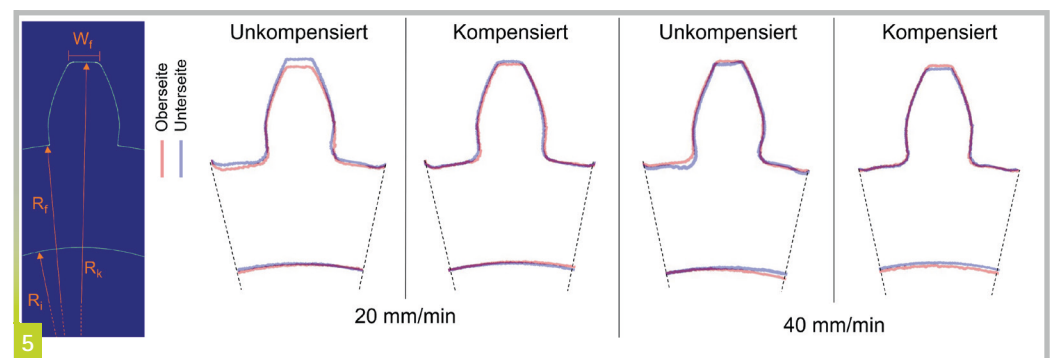


Abbildung 5
Vergleich von unkompensierten und kompensierten Zahnrädern für zwei verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten (Oberseite in rot; Unterseite in blau)

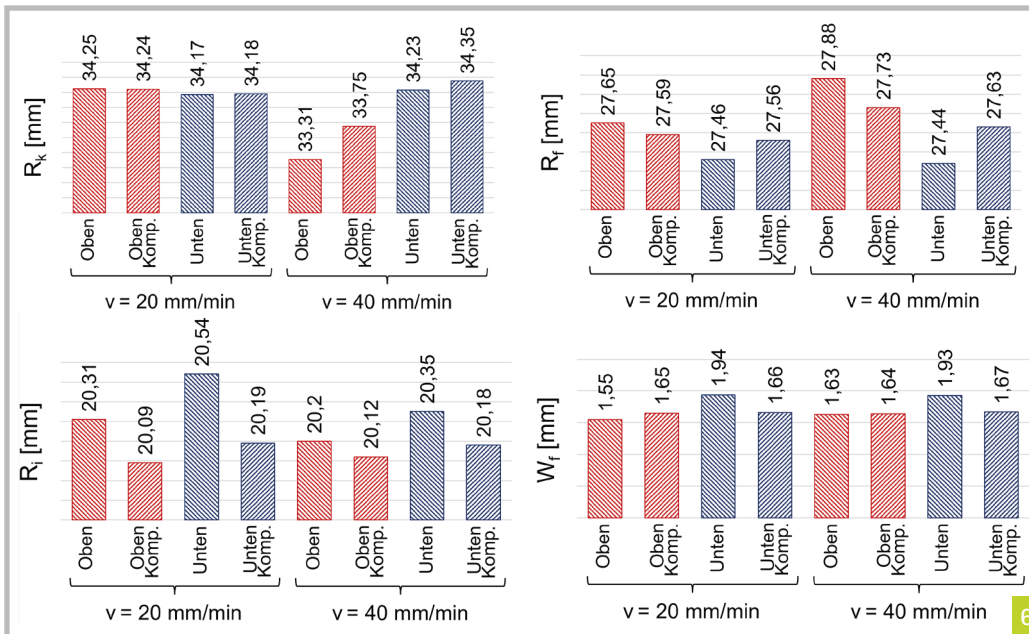


Abbildung 6
Diagramme über den Vergleich von unkompensierten und kompensierten Zahnradern für zwei verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten

Variation der Strahlaufweitung mit der Vorschubgeschwindigkeit wurde ebenfalls berücksichtigt (Abb. 7.c).

Obwohl sich durch die jeweiligen Optimierungen des grundsätzlichen Ansatzes (Vorschubgeschwindigkeitsvariation plus Kompensation des Restfehlers durch die Strahlorientierung) Verbesserungen einstellten, wurde das gute Ergebnis der Methode nach Henning nicht erreicht.

Die vorgestellte Methode unterscheidet sich von der Methode nach Henning durch zwei Merkmale: Die Variation der Vorschubgeschwindigkeit und der Berechnung der Strahlanstellung. Um herauszufinden, welches dieser Merkmale zu der Verschlechterung des Ergebnisses führt, wurde nun das Zahnrad mit variierender Vorschubgeschwindigkeit aber mit der Kompensationsmethode nach Henning

gefertigt. Außerdem wurde der bei den Variationen auftretende Bahndruck deutlich reduziert, um einen ruhigeren Wasserstrahl zu erhalten (Abb. 7.d).

Das Ergebnis (d) hat sich im Vergleich zu (a), (b) und (c) verbessert, liegt von den Genauigkeiten aber unter den Ergebnissen aus Abbildung 5, die mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit erzeugt wurden. Durch den Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen aus Abbildung 5 mit Vorschubgeschwindigkeit von 40 mm/min wurden die Differenzen zwischen der Oberseite und der Unterseite der Kopfhöhe, der Fußhöhe und den Innenradien um 0,17 mm, 0,16 mm bzw. 0,35 mm vergrößert, ohne eine Vergrößerung für Zahnradbreite.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das 3-D-Wasserstrahlmodell nach Henning zur Kompensation von Konturverletzungen bei der Wasserstrahlbearbeitung verwendet. Zunächst wurden die relevanten Parameter des Modells mit einer verbesserten einfachen Methode ermittelt, die sich auch ohne aufwändige Messmittel durchführen lässt. Die Methode ist schnell und kann in den Fertigungsbetrieb eines typischen Anwenders integriert werden. Eine einfache und eine anspruchsvolle 3-D-Geometrie wurden mit und ohne das Kompensationsmodell geschnitten. Die Ergebnisse zeigen, dass der Schnittwinkel und die Riefenbildung nach Anwendung des Kompensationsmodells nach Henning reduziert wurden, es hat jedoch den Nachteil großer Kompensationswinkel. Die besten Ergebnisse werden mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit erzielt.

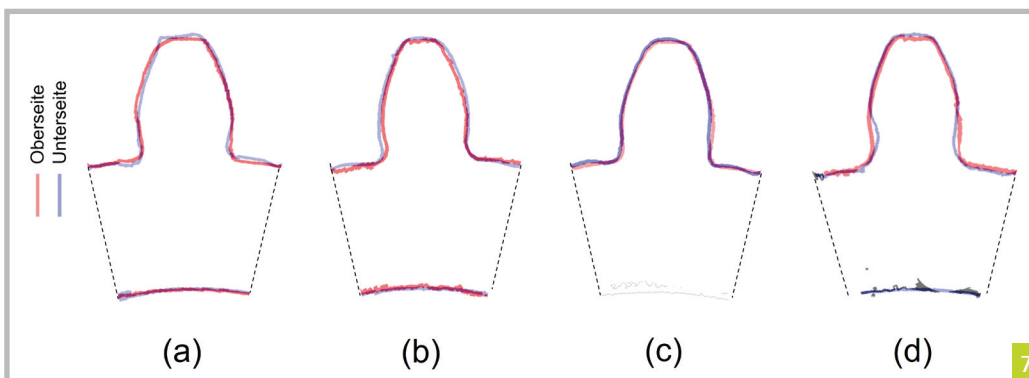


Abbildung 7
Kompensation durch Variation der Vorschubgeschwindigkeit

Maschinenbedingte Vorschubgeschwindigkeitseinbrüche führen zu Konturverletzungen.

Weiterhin wurden Versuche mit variierender Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt. Dabei wurden die zu erwartenden Konturverletzungen berechnet und die maximale Vorschubgeschwindigkeit zu einer gegebenen Fertigungstoleranz berechnet. Ziel war eine möglichst dynamische Bearbeitung des Werkstücks. Die Variation der Vorschubgeschwindigkeit führte zu einem deutlich schlechteren Fertigungsergebnis. Es wurden verschiedene Methoden der Strahlorientierung betrachtet, um das Ergebnis zu verbessern. Dennoch konnte mit keiner Methode das Ergebnis der konstanten Bahngeschwindigkeit erreicht werden.

Referenzen:

[1] Folkes J., *Waterjet – An innovative tool for manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, p. 6181-6189, 2009.

[2] Axmann B., *Analyse der Schnitt- und Kerbgeometrie sowie des Strahls beim Abrasivwasserstrahlschneiden*. Tech. Uni. Berlin, Berlin, Diss., 1999.

[3] Miao X et al., *Research on quality improvement of the cross section cut by abrasive water jet based on secondary cutting*. The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology 97, p. 71-80, 2018.

Eine mögliche Ursache ist die Verwendung von Hennings Modell. Die Parameter dieses Modells wurden bei konstanten Bahngeschwindigkeiten ermittelt. Man erhält auf diese Weise ein statisches Modell des Wasserstrahls. Möglicherweise unterliegt die Gestalt des Wasserstrahls bei Beschleunigungen und Abbremsvorgängen jedoch komplexen Veränderungen, die sich durch das statische Modell nicht abbilden lassen.

Die Kompensationsmodelle wurden nur für ein bestimmtes Werkstückmaterial, nämlich Aluminium, getestet. Für die weitere Nutzung dieser Kompensationsmodelle sollte es auch bei anderen, insbesondere schwer zerspanbaren Werkstoffen eingesetzt und getestet werden.

[4] Henning, A., *Modellierung der Schnittgeometrie beim Schneiden mit dem Wasserabrasivstrahl*. Univ. Stuttgart, Stuttgart, Diss., 2007.

[5] Hlaváč LM., *Investigation of the abrasive water jet trajectory curvature inside the kerf*. Journal of Materials Processing Technology 209, p. 4154-4161, 2009.

[6] Chen M et al., *Correcting shape error located in cut-in/cut-out region in abrasive water jet cutting process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102, p. 1165-1178, 2019.

Nach Abschluss der dargestellten Versuche wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden die vorgestellten Kompensationsmethoden bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit getestet. Zur Zeit läuft noch die Auswertung, die Ergebnisse werden in einer weiteren Veröffentlichung beschrieben werden.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme KMU-innovativ: Produktionsforschung (Förderkennzeichen 02P18K072) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

[7] Zeng J et al., *Taper-free abrasive waterjet cutting with a tilting head*. WJTA American Waterjet Conference, Paper 7A-2, Houston, Texas, 2005.

[8] Shanmugam DK et al., *Minimisation of kerf tapers in abrasive waterjet machining of alumina ceramics using a compensation technique*. Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, p. 1527-1534, 2008.

**Mohammad Dadgar, M.Sc.**

Mohammad Dadgar studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen University. Seit 2019 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich der Wasserstrahltechnologie am Fraunhofer IPT.
Kontakt: mohammad.dadgar@ipt.fraunhofer.de

**Dipl.-Ing. (FH) Manuel Schüler, M.Sc**

Manuel Schüler studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen University. Er ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPT und seit 2020 ist er Gruppenleiter im Bereich der Wasserstrahltechnologie.
Kontakt: manuel.schueler@ipt.fraunhofer.de

**Dipl.-Ing. Thorsten Schreiner**

Thorsten Schreiner studierte Elektro- und Informationstechnik an der RWTH Aachen. Seit 2019 leitet er die Forschungsaktivitäten der AixPath GmbH und beschäftigt sich intensiv mit der Entwicklung von CAx-Lösungen im Bereich der Wasserstrahltechnologie.
Kontakt: thorsten.schreiner@aixpath.com

**Dr.-Ing. Tim Herrig**

Tim Herrig studierte Maschinenbau und promovierte an der RWTH Aachen University. Seit Anfang 2020 leitet er die Abteilung »Wasserstrahlbearbeitung und elektroerosives Abtragen« am Fraunhofer IPT.
Kontakt: tim.herrig@ipt.fraunhofer.de

Stand und Zukunft der HD-Entgrat- und Reinigungstechnik

Ein Überblick über Technologie und Potentiale

Die Hochdruckwasserstrahltechnik ist ein relativ junges Verfahren zum Entgraten und Reinigen. Erste Versuche, Untersuchungen und Anwendungen wurden ungefähr 1980 gemacht. Die HDW-Technik gehört zu den „Nichtkonventionellen Verfahren zum Entgraten“. [1]

„Die ersten in mehreren amerikanischen und englischen Quellen bekanntgewordenen Bearbeitungsbeispiele zum Hochdruckwasserstrahl-Entgraten in der industriellen Fertigung waren Schaltschiebergehäuse für Automatikgetriebe aus Aluminium-Druckguss“. [2] Die damalige INDA Industrieausrüstungen war einer der Vorreiter der HDW-Technik in Deutschland, sowohl in der Anwendung im eigenen Fertigungsbereich, als auch bei der Entwicklung erster Anlagen in den frühen 90-iger Jahren. [3]

Heute ist die Hochdruckwasserstrahltechnik ein anerkanntes Verfahren zum Reinigen und Entgraten von Komponenten, die hohen Anforderungen an die Reinheit und Gratfreiheit stellen. Besonders in der Automobilindustrie, speziell im Getriebe- und Motorenbau, aber auch im Bereich der Bremsen und Lenkungen sind die Spezifikationen für die Sauberkeit in den letzten Jahren stark gestiegen. Restschmutzwerte von weniger als 2 mg/kg Bauteilgewicht und maximale Partikelgrößen von < 350 µm sind keine Seltenheit. Auch im Bereich der Industrie- und Mobilhydraulik ist die HD-Technik unverzichtbar.

Anwendung der HDW-Technik

Die HDW-Technik ist eines der wenigen Verfahren, das gleichzeitig Entgraten und Reinigen kann. Da mit reinem Wasser, meist mit Neutralreiniger Zusätzen, gearbeitet wird, ist eine aufwändige Nachbehandlung in der Regel nicht notwendig. Zum

Erzielen besonderer Reinheiten, glänzender Oberflächen oder sonstiger speziellen Eigenschaften (z.B. Langzeitkonservierung) ist meist nur ein Nachspülen mit Wasser (VE-Wasser oder Wasser mit entsprechenden Zusätzen) und ein Trocknen mit Heißluft und gegebenenfalls im Vakuum notwendig. Eine Vorbehandlung ist ebenfalls nur in Sonderfällen, bei großem Schmutzeintrag in Form von Ölen oder Spänen, mit einem wässrigem Medium notwendig. Hier reicht meist ein Spritzwaschen mit niedrigen Drücken (bis ca. 6 bar) aus.

Typische Bauteile für die HDW-Technik sind fertig bearbeitete Werkstücke, die durch ein Medium durchströmt werden und dabei sich lösender Grat oder Schmutz zu Ausfällen führen würde. Zum Beispiel bei einem Zylinderkopf können Späne im Wasserraum Kühlkanäle verschließen und zu einer Überhitzung führen, oder abbrechende Grate im Druckölkanal Schmierbohrungen an den Nockenwellenagersitzen verstopfen und so zu Ausfällen führen.

Abb. 1 zeigt zeigt das Innere einer HD-Kammer zum Bearbeiten von Ventilblöcken (unten) mit einem horizontalen Wasserfräser (Mitte hinten) und einer vertikalen Entgratlanze (vorne rechts).

Die Bauteilgeometrie kann dabei sehr komplex sein. Das Entgraten und Reinigen kann auch innerhalb des Bauteils, z. B. in tiefen Bohrung mit Bohrungsverschneidungen oder in Sacklöchern

erfolgen. Auch ein großflächiges Reinigen und Entgraten von Oberflächen ist möglich. Je nach Einsatzzweck verwendet man HD-Düsenlanzen mit zum Teil speziell angepasster Geometrie, rotierend oder feststehend, Wasserfräser, Düsenblöcke oder Sonderdüsen.

Durch immer engere Toleranzen, besonders bei Passungen und verlängerte Wartungsintervalle von heute bis zu 2 Jahren und über 30.000 km, auch bei Neufahrzeugen (PKW), sind die Anforderungen auf Restschmutz und Gratfreiheit in den letzten Jahren enorm gestiegen. Praktisch alle Zylinderköpfe und Zylinderkurbelgehäuse werden während ihrer Bearbeitung ein- oder mehrfach mit HD beaufschlagt. Besonderes Augenmerk liegt hier in den (Druck-) Ölkanälen und ihren Verschneidungen, den Lagerstellen für Kurbel- und Nockenwelle und besonderen Flächen, wie die Brennraumdichtfläche. Weitere oft mit HD-bearbeitete Werkstücke sind Ölfiltergehäuse, Ketten-, Zahnriemenspanner, Kurbel- und Nockenwellen, Nockenwellenlagergehäuse, etc.

Im Bereich der Getriebefertigung, insbesondere der Automatikgetriebe sind die Anforderung in Bezug auf Restschmutz (Gravimetrie und Partikelgröße) noch strenger, wie aus den Zeichnungsvorgaben zu entnehmen ist. Besonders für Bauteile der Mechatronik sind oft nur maximale Partikelgrößen bis 350 µm zugelassen und besonders

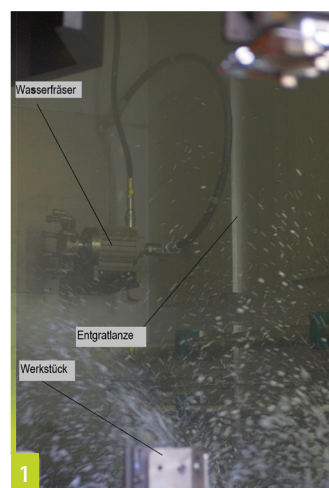


Abbildung 1
Innenansicht HD-Zelle

an den Schaltkanten im Bereich der Schieberbohrungen gelten besondere Anforderungen an die Entgratqualität. Je schärfer und gleichmäßiger die Schaltkante entgratet ist, desto exakter schaltet das Getriebe. Um das zu erreichen, sind neben dem Wasserstrahlentgraten konstruktive und fertigungstechnische Maßnahmen notwendig. Die gleichen Restschmutzanforderungen wie für die Mechatronikbauteile gelten auch für die Druckölbereiche im Getriebe- und gegebenenfalls Kupplungs- oder Wandlergehäuse.

In den letzten Jahren werden immer mehr Bauteile von Getrieben durch Schweißen (Laserstrahlschweißen oder Elektronenstrahlschweißen) gefertigt. Die dabei entstehenden Schweißspritzer (Schweißperlen) können ebenfalls durch HD-Strahlen sicher und vollflächig entfernt werden.

Wirkungsweise der HDW-Technik Entgraten

Grate entstehen bei der mechanischen Bearbeitung von Bauteilen durch Materialverdrängung (plastisches Fließen). Je stumpfer ein Werkzeug ist oder bei falsch gewählten Schnittdaten kann sich dieser Effekt verstärken. Diese Grate können die Funktion eines Bauteiles stören, z. B. an Schieberbohrungen oder im Betrieb abbrechen, in Lagerstellen gespült werden und dort zu Ausfällen führen.

Der aus der Düse unter hohem Druck ausströmende Wasserstrahl hat eine hohe kinetische Energie. Die Geschwindigkeit beträgt bis zu 1/3 der Schallgeschwindigkeit. Trifft dieser Strahl auf einen Grat so kommt es nach dem Impulssatz zu einer Wechselwirkung. Bei einem genügend hohen Impuls bricht der Grat an seiner dünnsten Stelle ab und wird weggespült. Wegen der physikalischen Wirkungsweise sollte der Grat möglichst rechtwinklig getroffen werden und „frei stehen“, d.h. sich nirgends anlegen oder abstützen können. Die feste Gratwurzel bleibt stehen. Bei der festen Gratwurzel

handelt es sich nicht um einen Grat im herkömmlichen Sinne. Bedingt durch seine Entstehung handelt es sich hier um plastisch verformten Werkstoff, der im allgemeinen eine höhere Festigkeit als der Grundwerkstoff aufweist. Bereits im Vorfeld, während der Fertigungsplanung muss die Bearbeitungsreihenfolge und Entgratreihenfolge festgelegt werden, damit die verbleibende Gratwurzel nicht die Funktion oder Montagefähigkeit des Werkstückes stört. Es gibt noch andere Fälle bei denen die verbleibende Gratwurzel stört und nicht zulässig ist. Zum einen kann in hydraulischen Systemen die Gratwurzel zu Störungen in der Strömung führen und bei hohen Belastungen kann hier ebenfalls durch Spannungskonzentration (Spannungspitzen) ein Dauerbruch ausgehen. Mit der HDW-Technik ist es nicht möglich gezielt definierte Phasen oder Verrundungen zu erzeugen. Das Werkstück wird „scharfkantig-gratfrei“ entgratet. Die Prüfung erfolgt nach dem sogenannten „Carbonstift-Verfahren“ oder subjektiv anhand von Grenzmustern. Als Faustformel kann davon ausgegangen werden, dass die Grate entfernt werden können die mit einem Bleistift oder dem Fingernagel entfernt werden können.

Bei sehr hohen Drücken oder langen Einwirkzeiten kommt es zu abrasiven Abtragungen, bei denen Material unkontrolliert entlang den Korngrenzen abrasiv abgetragen wird. Auch hier sind definierte Verrundungen oder Oberflächengüten nicht herstellbar, im Gegensatz zu anderen, speziellen Verfahren, wie z.B. das Strömungsschleifen, Druckfliessläppen oder Elektrochemisches Entgraten. Bei diesen Verfahren wird oft die HDW-Technik zum vorentgraten, bzw. zu einem gründlichen Entspänen und Reinigen der Bohrungen vor dem eigentlichen Entgraten verwendet.

Bedingt durch die obenstehende Wirkungsweise des HD-Entgratens sind besonders spröde Werkstoffe gut zum entgraten

geeignet. Je zäher oder fester ein Werkstoff wird, desto geringer wird der Entgrateffekt. Aluminium-Gusswerkstoffe und gehärtete Stähle sind daher gut zum Entgraten geeignet; Al-Presswerkstoffe wegen ihrer Zähigkeit weniger. Praktisch nicht entgratet werden können hochfeste, zähe Stähle, wie z.B. für Kurbelwellen. Bei Drücken von 160 – 300 bar spricht man von HD-Reinigen, bei Drücken von ca. 300 bar beginnt der Entgrateffekt bei Aluminium. Meist wird Aluminium (Kokillen- oder Druckguss) bei Drücken von 400 – 600 bar entgratet. Al-Press- und Schmiedeteile werden bei Drücken bis ca. 800 bar bearbeitet, ebenso Magnesium-Gussteile. Bei Stahl und Gusseisenwerkstoffen werden Drücke von 600 – 800 bar, in Sonderfällen bis 2.000 bar verwendet.

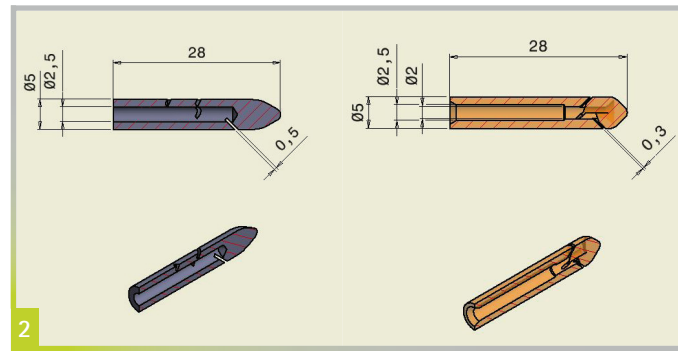
HD-Reinigen

Beim Reinigen mit Hochdruck wird ebenfalls die hohe kinetische Energie des Wasserstrahls verwendet, um zum einen die Adäsion des Partikels zu überwinden und zum anderen, um Schmutzpartikel zu verdichten und zu verspröden um sie dann zu zerstören und ebenfalls leicht abwaschen und wegschwemmen zu können. Das Unterspülen des Partikels spielt ebenfalls eine große Rolle beim Reinigen. Die Restschmutzprüfung erfolgt im Allgemeinen nach den Vorgaben der Richtlinie VDA19.

Eine Gefahr der HDW-Technik besteht darin, dass der Wasserstrahl Oberflächen beschädigen kann. Dies geschieht häufig bei Al-Druckguss-Werkstoffen am Ende der Standzeit der Druckgussform, wenn zu kalt gegossen oder mit zu wenig Druck nachverdichtet wird. Hier kann es zu Lunkerbildung an der Oberfläche kommen, die der HD-Strahl komplett oder teilweise freilegt. Ferner werden bei Aluminium Werkstücken aus der Oberfläche feine Aluminium und Silizium Partikel herausgelöst, die die Anlage stark verschmutzen und die Filter schnell verblocken. Bei ferritischen Gusswerkstoffen (GGG, GGL, GGJ) besteht die Gefahr, dass der Kohlenstoff (Graphit) an der Oberfläche aus-

Abbildung 2

Links: HD-Düsen 360° Abstrahlwinkel: Stahl, gedreht, erodiert, gehärtet; Standzeit ca. 80h (bei 600 bar)
 Rechts: HD-Düsen 360° Abstrahlwinkel: Sonderstahl, additives Fertigungsverfahren, wärme- und oberflächenbehandelt; Standzeit ca. 200 h (bei 600 bar), ca. 15% verbessertes Abtragverhalten



gewaschen wird, und so die Notlaufeigenschaften verschlechtert werden. In Sonderfällen wird der Effekt der Oberflächenzerstörung bewusst herangezogen. Um zum Beispiel die Zylinderlaufflächen an Zylinderkurbelgehäusen so an der Oberfläche aufzurauen, dass für einen nachfolgenden Beschichtungsprozess eine feinporige Oberfläche entsteht. Hier kommen Drücke bis 1.500 bar (und mehr) zum Einsatz.

Ein physikalisches Phänomen das den Reinigungsprozess behindert, besteht darin, dass sich beim kontinuierlichen Beaufschlagen mit Medium auf der Oberfläche ein Film bildet, der die Wirkweise des Wasserstrahles dämpft. Durch pulsieren des Strahls kann das Medium an der Oberfläche während der Spritzpause abfließen und der „neue“ Strahl dringt bis zur Oberfläche vor. Dadurch verbessert sich die Reinigungswirkung, bzw. es lässt sich bei weniger Medieneinsatz und Drücken die gleiche Wirkung erzielen. Auch beim Entgraten unterstützt ein pulsierender Strahl das Ergebnis positiv. Erste Ansätze, die pulsierende oder rotierende Strahlen nach dem Prinzip der Resonanz, verschleißarm und ohne mechanische Elemente, erzeugen, sind in der Entwicklung bzw. im Einsatz. Eine andere, einfache Möglichkeit, die Oberfläche, bzw. den Grat pulsierend zu beaufschlagen, besteht darin, rotierende Düsen mit mehreren Düsenaustritten oder Wasserfräsern mit einzelnen Düsen, die motorisch angetrieben werden, einzusetzen.

Das HD-Medium

Das Medium beim HDW-Strahlen wird im Kreislauf gefahren. Als

Medium wird Stadtwasser, reines VE-Wasser oder eine Mischung aus beiden (8 - 18°dH), meist mit einem Neutralreinerzusatz (0,5 - 5%) verwendet. Der Neutralreiner hat hauptsächlich die Aufgabe Öle und Fette im Medium als Emulsion zu binden und nach dem Trocknen einen temporären Korrosionsschutz zu erzeugen und die Pumpe zu schmieren. Die in das Medium eingetragenen Schmutzpartikel müssen durch geeignete Filtrationen entfernt werden. Die Art der Filtration ist abhängig von der Beschaffenheit und Menge des eingetragenen Schmutzes und der Druckstufe der HD-Pumpe. Es kommen z.B. Endlosbandfilter bei großen Schmutz-/Spänefrachten, Beutel- und Kerzenfilter unterschiedlicher Feinheit und Qualität zum Einsatz. Zur weiteren Badpflege können Ölabscheider, (Vakuum-) Destillationsanlagen oder Sonderfilter, wie Ultrafiltrationen, zum Einsatz kommen.

Der Zusatz von Abrasivmitteln hat sich in der HDW-Technik nicht durchgesetzt. Auf der einen Seite würde es die Entgratwirkung verbessern aber auf der anderen Seite die Bauteile mit abrasiven Partikeln kontaminieren, die dem Ziel der gründlichen Reinigung entgegenstehen.

In seltenen Fällen wird auch Öl als Entgratmedium verwendet. Der Vorteil liegt darin, dass bei einer mechanischen Bearbeitung mit Öl vor und nach dem Entgraten kein Entölen (Reinigen) oder wiederbeölen notwendig ist und damit Öl eingespart werden kann. Die Entgrateinheit kann gegeben falls direkt in die Bearbeitungsmaschine integriert werden. Von Nachteil ist die geringere Dichte

von Öl (ca. 90%) gegenüber Wasser und der daraus resultierende geringere Energiegehalt des Ölstrahles. Ein besonderes Augenmerk muss dem Brand- und Explosionsschutz gelten.

Die HD-Düse

Das eigentliche Werkzeug bei der HDW-Technik ist die Düse. Sie erzeugt aus dem Druck den Wasserstrahl mit hoher kinetischer Energie und gibt die Richtung und Geometrie des Strahles vor. Wie bei einer Werkzeugmaschine kommen Standard und Sonderwerkzeuge zum Einsatz. Hier können Standarddüsen mit fest vorgegebenen Eigenschaften, wie Düsengeometrie (Punktstrahl, Flachstrahldüsen mit 5° - 90° Strahlwinkel), die in Grundkörper, (z. B. Wasserfräser) eingeschraubt werden, als Standardwerkzeuge angesehen werden. Sonderdüsen, meist Düsenlanzen, müssen individuell an die Entgrat- und Reinigungsaufgabe angepasst werden. Wie oben beschrieben, sollte der Grat rechtwinklig getroffen werden; es müssen aber auch weitere Randbedingungen, wie Bohrungsdurchmesser, Bohrungstiefe beachtet werden. Solche Düsen werden heute meist aus härtbaren Edelstählen durch Drehen, Bohren und Fräsen gefertigt. Bedingt durch die Fertigungsverfahren lassen sich meist nur Punktstrahldüsen erzeugen. Eine Strömungsoptimierung innerhalb der Düse ist nur bedingt möglich, die Standzeiten sind relativ kurz.

Durch neue Fertigungsverfahren, wie die additive Fertigung (Lasersintern), lassen sich fast unbegrenzte Düsengeometrien erzeugen, die auch strömungsoptimiert werden können. Durch den Einsatz von speziellen Werkstoffen, Wärme- und Oberflächenbehandlungen lassen sich auch Sonderdüsen mit hohen Standzeiten fertigen. Durch den Einsatz von strömungsoptimierten Düsen und anderen Komponenten, wie z.B. HD-Verteiler lässt sich der Druckverlust reduzieren und auch die Wasserverteilung zu einzelnen Düsenaustritten lässt sich gleichmäßiger gestalten. Dies hat den Vorteil, dass kleinere

Pumpen in Bezug auf Druck oder Förderleistung verwendet werden können.

Aufbau einer HD-Anlage

Man unterscheidet grundsätzlich 2 Arten von HDW-Maschinen. Zum einen wird das Werkstück in einer Spannvorrichtung, ähnlich der von Werkzeugmaschinen eingespannt und die Düsen fahren zur Entgratstelle und führen die Entgratbewegung durch. Die Düsen werden durch Linearsysteme bis hin zum 3-achsigen CNC-System oder Robotern bewegt. Über Düsenwechselsysteme oder mehrspindelige können unterschiedliche, dem Einsatz angepasste Düsen zum Einsatz gebracht werden. Bei der anderen Art von HDW-Anlagen wird das Werkzeug zur Düse oder anderen Entgratwerkzeugen, wie Bürsten oder Entgratfräsern geführt. Die Bewegung des Werkstückes erfolgt meist durch Roboter, roboterähnlichen Manipulatoren oder klassischen, mehrachsigen CNC-gesteuerten Linearsystemen. Dies funktioniert bei Werkstückgewichten bis ca. 100 kg. Alle zum Einsatz kommenden Systeme müssen vor den HD-Strahlen geschützt werden. Dies geschieht am einfachsten, indem die mechanischen Komponenten, wie Führungen, Antriebe, Sensoren im „Trockenen“ außerhalb

der Maschine aufgebaut werden und nur das Spritzrohr, bzw. der Greifer mit dem gespannten Werkstück in den Nassraum ragt. Roboter und andere Manipulatoren, die sich mit dem Werkstück und den Düsen innerhalb des Nassraumes befinden, benötigen einen besonderen Schutz. Bei Robotern sind dies besondere Ausführungen, wie sie die führenden Roboterhersteller im Angebot führen oder Schutzanzüge, die den gesamten Roboter überdecken.

Zukunft der HD-Technik Energieverbrauch

Der Betrieb einer Hochdruckwasserstrahlanlage ist sehr energieintensiv. Im Zuge des allgemeinen Zwangs Energie zu sparen und damit den CO₂-Ausstoss zu reduzieren muss auch die HDW-Technik Möglichkeiten suchen und Lösungen finden, dem entgegen zu können. Den größten Energiebedarf hat die Hochdruckpumpe. Hier sind Anschlusswerte von 37 – 300 kW normal, meist kommen Pumpen zwischen 55 und 160 kW zum Einsatz. Die meisten Pumpen werden heute mit Frequenzumrichtern und einer Steuerungs- und -Regelungssoftware betrieben, die den Druck und die erforderliche Wassermenge feinfühlig regelt und die „Energieverschwendung“ über den Bypass im Druckregelventil verhindert.

Einsparpotentiale

Ein einfacher Weg, Energie zu sparen, besteht darin, die Düsengeometrie zu verändern. Durch den Fertigungsfortschritt bei der spanenden Bearbeitung von Aluminiumbauteilen mit PKD-Werkzeugen, z.B. an Schaltschieberplatten für Automatikgetrieben, ist es möglich beim Entgraten der Labyrinthseite mit Wasserfräsern statt der üblichen Punkstrahldüsen Flachstrahldüsen mit ca. 5° Strahlwinkel einzusetzen. Bei sonst unveränderten Parametern, wie Druck und Vorschub kann bedingt durch die größere Flächenleistung die Düsenanzahl, und damit der Wasser- und Energieverbrauch ungefähr halbiert werden. In diesem konkreten Fall (s.u.) werden ca. 110.000 kWh Strom, bzw. rund 66 t CO₂ nach dem heutigen Energiemix [4] eingespart.

Meist werden an den oben genannten Schaltschieberplatten sowohl die Labyrinth- als auch die Rückseite mit demselben Druck beaufschlagt. Zurzeit laufen Versuche, dass die Rückseite nur noch mit Drücken von ca. 50 bar bearbeitet werden. Dies spart Energie und verhindert unerwünschte Auswaschungen von Al- und Siliziumpartikeln; das Reinigungsergebnis ist aber dennoch gegeben, wie erste Ergebnisse zeigen.

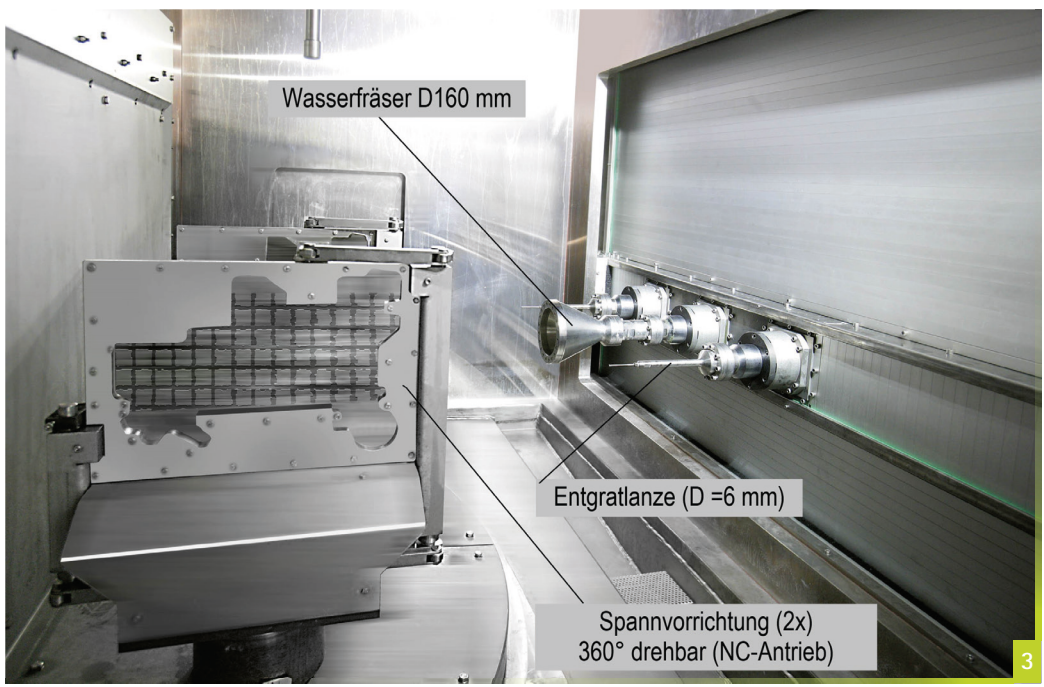


Abbildung 3
HCflex2XL: Bearbeiten Schaltschieberplatten mit 3-Spindeln

Benennung	Punktstrahldüse	Flachstrahldüse 5°
Fräserdurchmesser [mm]	150	150
Bearbeitungsdruck [bar]	600	600
Anzahl Düsen	5	3
Verbrauch Düse (600 bar) [l/min]	15,3	15,3
Wirkbreite in 30 mm Abstand [mm]	1	2,6
Vorschub/Umdrehung [mm] (10% Überdeckung)	4,5	7,02
Verfahrweg [mm]	960	960
Bearbeitungszeit [s]	20	20
Drehzahl Fräser [1/min]	640	410
Hydr. Leistung [kW]	76,5	45,9
effektive Leistung [kW]*	85	51
Stromverbrauch/Stk [kWh]	0,472	0,283
Taktzeit [s]	28	28
Werkstücke/a**	578571	578571
Stromverbrauch/a*** [kWh]	273214	163929
CO ₂ -Ausstoß**** [kg]	109559	65735
Einsparung Strom [kWh]	-	109286
Einsparung CO ₂ [kg]	-	43824

Tabelle 1
Vergleich Punktstrahldüse - Flachstrahldüse

* Pumpenwirkungsgrad 90%
 ** 250 At/a, 3 Schichten a 7,5 h, 80%
 Linienverfügbarkeit
 *** nur HD-Bearbeitung
 **** Stand 2019: 401 g CO₂/kWh

Ebenfalls durch den Fortschritt bei der Bearbeitung können die Wasserdrücke reduziert werden. So wurden z.B. ABS-Gehäuse der 1. und 2. Generation noch mit Drücken bis 800 bar beaufschlagt. Heute werden die aktuellen Generationen noch mit ca. 500 bar bearbeitet. Dies hat ebenfalls ein Reduzieren des Energiebedarfes von ca. 35% zur Folge.

Heute werden viele Bauteile, wie z.B. Zylinderköpfe oder Getriebegehäuse vollflächig mit HD bearbeitet. Meist kommen dabei Wasserfräser mit 3-10 Düsen zum Einsatz. Da dabei nicht nur Späne und Schmutz an der Oberfläche und in Bohrungen entfernt werden müssen, sondern auch Flächen und Kanten entgratet werden müssen, wird hier mit hohen Drücken gefahren. Die Flächen und Kanten werden dabei, wie oben erwähnt; „scharfkantig-gratfrei“. Dies ist aber oft für den späteren Montageprozess unerwünscht, da hier die Gefahr von Verletzungen für die Werker besteht oder durch die scharfen Kanten Dichtungen beschädigt werden können. Da es sich hier meist um frei zugängliche Stellen handelt, können diese auch mit Bürsten entgratet werden. Beim Bürstentgraten findet eine Verrundung der Kanten

statt. Zum Bürstentgraten sind wesentlich geringere Leistungen an der Bürstspindel nötig; meist sind 1,5 - 3,0 kW ausreichend. Bürstentgratwerkzeuge können in HD-Maschinen, z.B. in Roboterzellen integriert, sodass ein kombinierter Prozess ohne Probleme durchgeführt werden kann. Der HD-Prozess kann dann mit relativ geringen Drücken (bis 200 bar) ausgeführt werden. Für innenliegende Bohrungen und Verschneidungen wird dann mit vollem Druck entgratet. Mithilfe von frequenzgeregelten HD-Pumpen mit Druck- und Mengenregelung kann das sehr energieeffizient durchgeführt werden.

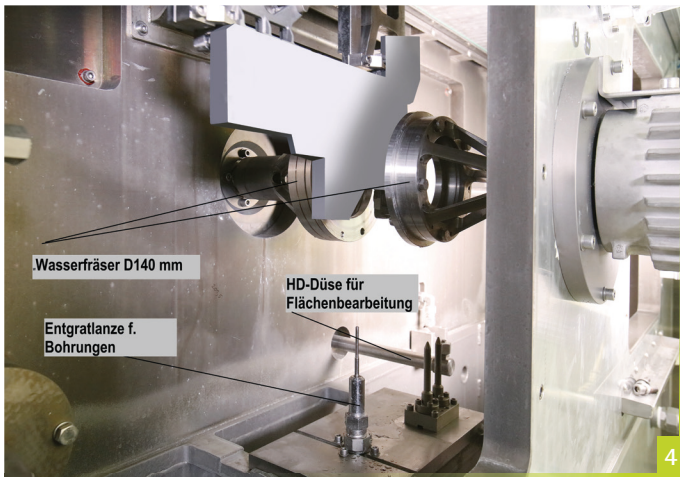
Weitere Möglichkeiten zur Reduktion der Energie und des CO₂-Ausstosses liegen in einem geregelten, automatischen Herunterfahren der Anlage, wenn längere Zeit keine Werkstücke mehr kommen. Es kann auch Energie aus den entstehenden Schwaden durch Rückkühlen gewonnen werden.

Zukünftige Werkstücke für die HDW-Technik

Mit der E-MOBILITÄT entfallen viele Bauteile und Komponenten, die heute mit HD-Wasserstrahlen

bearbeitet werden, wie z.B. Zylinderköpfe, Zylinderkurbelgehäuse, Kurbelwellen, ... Aber weit mehr Teile entfallen durch den Wegfall, bzw. Vereinfachung (nur 1- oder 2-stufig) der Getriebe. Besonders bei Automatikgetrieben waren vielen Teile nur mit Hilfe der HDW-Technik prozesssicher und kostengünstig auf die geforderten Restschmutzwerte und Gratfreiheit zu fertigen. Es kommen aber auch neue Werkstücke hinzu. Hier sind als erstes die Motorgehäuse oder Statorgehäuse zu nennen, die ebenfalls gratfrei und mit geringen Restschmutzwerten in Bezug auf die Partikelgröße gefertigt werden müssen, da sie im Innern durch Kühlmedien durchströmt werden und sich lösende Partikel zu Störungen des Motors und Ausfall der Kühlung führen können.

Ebenfalls hd-gereinigt und entgratet werden müssen die sogenannten Batteriekästen bei Fahrzeugen mit Batterieantrieb. Diese großvolumigen, komplexen Bauteile aus Aluminiumdruckguß oder Aluminiumschweißteilen haben ebenfalls hohe Anforderungen an den Restschmutz, da auch hier loser, metallischer Restschmutz in Form von Partikeln oder sich lösender Grat zu Kurzschlüssen führen kann.



die sich nur wirtschaftlich und sinnvoll mit der HDW-Technik reinigen und entgraten lassen. Durch reduzierte Drücke, Kombiprozesse, oder nur gezieltes Beaufschlagen kritischer Stellen lässt sich viel Energie einsparen. Man muss aber auch die Vorzüge der HDW-Technik betrachten, wie das Entgraten von Bohrungsver-schneidungen an von außen nur schwer oder nicht erreichbaren Stellen oder die Möglichkeit von Reinigen und Entgraten in Einem.

Abbildung 4
HCbox: Bearbeitungskammer mit HD-Werkzeugen für Ventilplattenbearbeitung

Bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb kommen ebenfalls nur die Teile des Antriebes, also E-Motor und Rumpfgetriebe, zum HD-Reinigen in Betracht.

Bei der Wasserstofftechnik treten Betriebsdrücke von bis zu 800 - 1000 bar in den Bereichen der Betankung und Lagerung auf. Für die hier eingesetzten Bauteile ist daher eine hohe Sauberkeit (Gravimetrie und Partikelgröße) und Gratfreiheit erforderlich. Die Anforderungen sind mit heutigen modernen Dieseleinspritzsystemen (Einspritzdrücke bis 2.200 bar) vergleichbar. Für die Ventile und Druckreduzierer, etc. kommen daher ähnliche Verfahren zur Anwendung, das heißt, meist Kombinationsprozesse aus Hochdruckbearbeitung zum „Vor-entgraten“ und Entspänen und ein abtragendes Verfahren zur Kantenverrundung, z. B. elektrochemisches Entgraten (ECM).

Ein neues Feld für die HD-Technik ist das Reinigen und Entgraten von komplexen Bauteilen aus Al-Guss für Fahrzeuge. Diese Integralbauteile, wie z.B. komplette Türschweller, Motorträger, usw., werden nach dem Gießen mechanisch bearbeitet und müssen nach dem Reinigen komplett gratfrei (Verletzungsgefahr) und fettfrei zur Montage (kleben, schweißen) und Lackieren sein. Diese Werkstücke werden großflächig mit Wasserfräsern und gezielt (Bohrungen) mit Drücken von 200 - 600 bar beaufschlagt. In den Hohlräumen dürfen sich keine Späne befinden, da diese

beim Lackiervorgang durch ausschwemmen zu Problemen führen können.

Der Zwang zu höherer Energieeffizienz und Langlebigkeit bei höherwertigen Konsumgütern wird ebenfalls Potential für Werkstücke liefern, die mit HD-Wasserstrahlen entgratet und gereinigt werden müssen.

Die beim Verdichten des Wassers eingesetzte Energie geht fast ausschließlich in Form von Wärme in das Medium über. Meist wird diese Wärme über Rückkühlung durch Kühlwasser (Kreislaufkühlwasser, Fluß-, Seewasser, ...) an die Umgebung abgeben. Eine direkte Nutzung der Wärme ist durch ihr niedriges Temperaturniveau, ca. 45 bis 60°C meist nicht möglich. Durch Einsatz einer Wärmepumpe kann ein höheres Temperaturniveau erreicht werden, dass zum Beheizen von Vorreinigungs- oder Nachspülmedien verwendet werden kann. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass das Wärmepotential nur bei Betrieb der HD-Pumpe ansteht. Bei einem Badwechsel aller Medien muss auch hier konventionell geheizt werden, um zum Produktionsstart die erforderlichen Temperaturen für einen ordnungsgemäßen Prozess sofort zur Verfügung stehen zu haben.

Wie oben beschrieben, gibt es in der HDW-Technik Potential zur Energieeinsparung, auch werden weiterhin Bauteile, wenn auch in geringerer Stückzahl und Vielfalt wie heute, vorhanden sein,

Referenzen:

- [1] A.P. Thilow et al., *Entgrat-Technik*, Ehningen b. Böblingen, Expert-Verlag, 1992.
- [2] A.P. Thilow et al., *Entgrat-Technik*, S 217, Ehningen b. Böblingen, Expert-Verlag, 1992.
- [3] Roland Ponterlitschec, *Rede zum Einzug in den neuen Firmensitz der Fa. INDA Industrieausrüstung*, 1993.
- [4] Bilanz 2019: *CO2-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter* | Umweltbundesamt (Strom-report.de)



Dipl.-Ing. Hans-Martin Meyer

1980 – 86 Maschinenbaustudium an der Universität Stuttgart
seit 1994 INDA Wasserstrahltechnik GmbH, heute Leiter Vertrieb und Projektierung
Kontakt:
hm.meyer@inda-wasserstrahltechnik.de

Präzisions-Wasserstrahlschneiden als integrierter Bestandteil moderner Fertigung

Wirtschaftliche Prozesskettenintegration von Wasserstrahlanlagen

Reinwasser- und Abrasivschneiden hat sich längst in vielen Branchen für nahezu alle Materialien als wichtige Technologie etabliert. Die generelle Funktionsweise dieses sogenannten 'kalten' Trennverfahrens wird im Folgenden als bekannt vorausgesetzt. Beispielhaft soll vielmehr beleuchtet werden, wie durch Integration insbesondere des Wasser-Abrasivschneidens mit anderen Technologien Fertigungsprozesse deutlich optimiert wurden und werden.

Wasserstrahlschneidanlagen als Verfahrensoptimierer sind je nach Branche, Anwendung und Materialvielfalt durchaus sehr unterschiedlich aufgebaut – es gibt nicht das 'eine' alle Aufgaben lösende Universalsystem, denn schon alleine auf Grund der vorhandenen Größen bzw. Geometrien von Rohmaterialien und gewünschten Teilespezifikationen muss es Unterschiede geben. Darüber hinaus spielen auch gewünschte Teilegenauigkeiten und Oberflächengüten bei der Systemkonfiguration für die Bearbeitung eine wichtige Rolle – hier sei bereits erwähnt, dass unterschiedliche bewegliche Schneidköpfe mit kleinen und großen Winkelbewegungen für unterschiedlichste Anwendungen bis zu der Integration einer Rotationsachse zum Tragen kommen können. Zusätzlich sind Parameter wie Prozesssicherheit und Einhaltung von Vorschriften für

Bediener und Umwelt entscheidende Anforderungskriterien für den Betreiber eines Wasserstrahlschneidsystems. Als zentrales Werkzeug für die Anwendung wird heutzutage überwiegend einfach zu bedienende Windows-Steuerungssoftware eingesetzt, welche sowohl in der Arbeitsvorbereitung als auch an der Maschine im gleichen Umfang zur Verfügung steht. Im Büro simulierte Bearbeitungszeiten sollen mit der tatsächlichen Maschinenzeit exakt übereinstimmen um eine verlässliche Produktionsvorschau zu erhalten. Dies ist im Bereich der Zerspaltung übrigens genauso (Stichwort Digitaler Zwilling). Am Ende muss die IT-Abteilung auch Produktionsdaten mit kaufmännischen Daten einfach koppeln können (Vor- und Nachkalkulation), aber auch die Maschinenzustände sollen jederzeit transparent sein (vorausschauende Wartung).

Die Anwendungsvielfalt des Wasserstrahlschneidens ist nahezu beliebig. Im Abschnitt A wird ein Beispiel aus dem Maschinenbau detailliert betrachtet. Technologische Darstellungen aus Abschnitt A können sinngemäß auf viele andere Branchen im Bereich Metallbearbeitung aber auch für die Anwendungen im Bereich Kunststoff, Glas, (z.B. im Fahrzeugbau) übertragen werden. Abschnitt B ergänzt um eine kurze technische und kaufmännische Darstellung von Merkmalen für Wasserstrahlschneidsysteme und deren Betreiber.

Abschnitt A: Bearbeitung von Metallen

Ein Beispiel aus dem Maschinenbau soll die Integration des Wasserstrahlschneidens in der Fertigung von Antriebswagen von Plasma- bzw. Brennschneidanlagen verdeutlichen. Hier geht

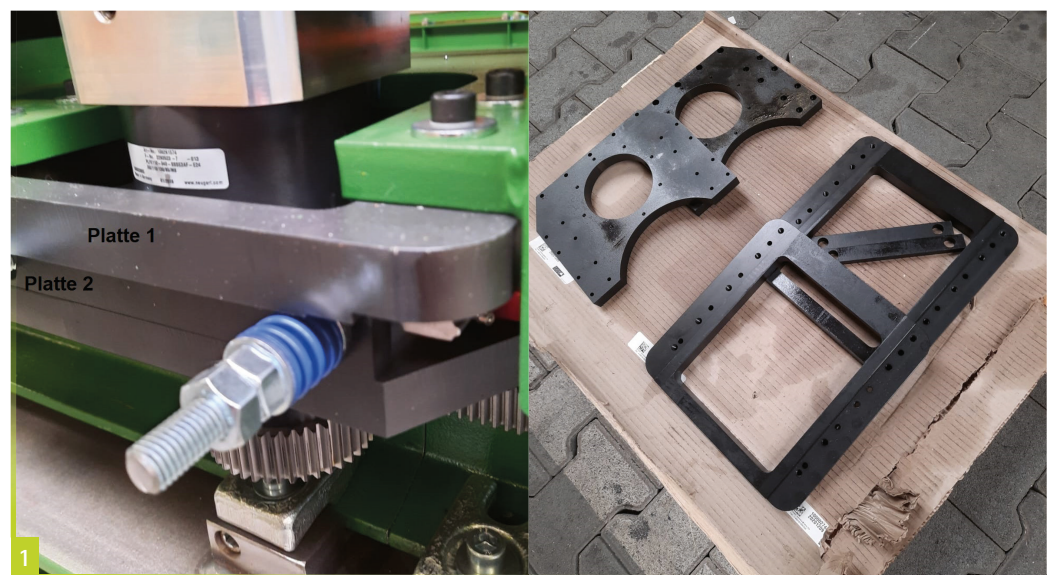


Abbildung 1
Antriebswagen einer SATO-Brennschneid-
anlage – Platten 1(rechts)+2 vor Einbau

es um kleine bis mittlere Serien, so dass eine automatisierte und werkzeugoptimierte Zerspanung nicht betrachtet wird.

Die Innen- und Außenkontur beider nummerierten Bauteile werden häufig thermisch aus Baustahlrohplatten (z.B. 2500 x 1250 mm² = Mittelformat) in der gewünschten Anzahl ausgeschnitten (Platte 1 - Materialstärke 25 mm, ca. 280 mm x 280 mm außen / Platte 2 - Material-

Sowohl die Durchgangs- als auch die Kernbohrungen für die Gewinde sind direkt mitgeschnitten worden. Verfügt die Wasserstrahlschneidanlage über einen hochpräzisen Schwenkkopf zur Kompensation des natürlichen Schneidkonus, sind die Schnittkanten aller Konturen und Durchbrüche zylindrisch / senkrecht bis auf wenige hundertstel Millimeter genau. Keine der Kanten weist eine Änderung des Gefüges auf. Bei manchen Teilen sind bei

gleichen Arbeitsgang hergestellt werden). Auch zur Teilebeschriftung und/oder Markierung per Relief wird der Wasserstrahl ebenfalls genutzt. Alle ausgeschnittenen Werkstücke sind in sich geometrisch schlüssig, da sie vollständig im gleichen Arbeitsgang und im gleichen Koordinatensystem bearbeitet wurden. Im Bedarfsfall kann jedem einzelnen Konturelement des Schneidauftrages eine definierte Kantenqualität zugeordnet werden

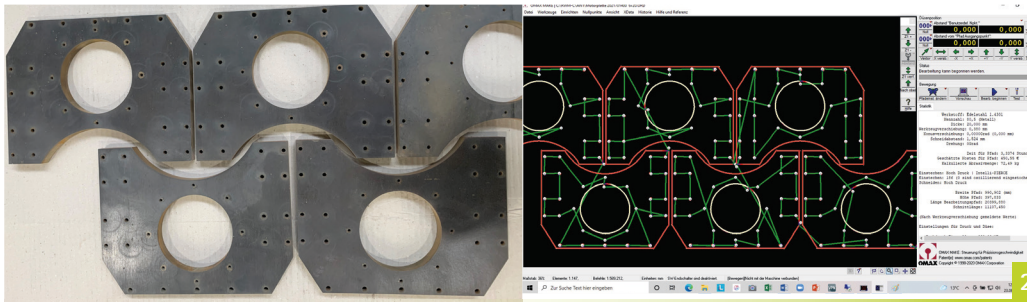


Abbildung 2
Verschachtelung (Foto geschnittene Teile und Screenshot eines Ausschnitts)

stärke 20 mm, ca. 275 mm x 210 mm außen). Alle Bohrungen beider Platten mit entsprechend kleinen Innendurchmessern sind thermisch bei dieser Materialstärke nicht herzustellen, auch die Schnittkanten der Konturen müssten für die nachfolgende Zerspanung zunächst nachgearbeitet werden. Die CNC-Zerspanung bedarf daher einer ausgefeilten Nullpunktfindung um die Bohrungen und Gewinde positionsgenau für alle 'vorgebrannten' Teile herzustellen - in der Regel Teil für Teil - bevor es zu den nächsten Arbeitsschritten geht.

einigen Konturen sogar definierte Freiwinkel präzise einzubringen, was der entsprechende Schwenkkopf ebenfalls leisten sollte.

Darüber hinaus werden größere Durchbrüche (sonst sehr häufig Ausschuss) im gleichen Arbeitsgang wie oben beschrieben direkt genutzt, um andere Werkstücke aus derselben Rohplatte somit sehr materialsparend auszuschneiden (siehe auch Abbildung 1, unter der oberen Platte 1 befinden sich zwei Bauteile, welche in der Produktion in größerer Stückzahl benötigt werden - je 9 Teile können innerhalb einer Innenkontur Platte 1 im

Rz-Werte von 16 bzw. Ra-Werte von 2,5 aufsteigend (Qualität 1 - gröber) bis (Qualität 5 - sehr fein) sind erreichbar - so kann Einfluss auf die nachfolgenden Bearbeitungsschritte genommen werden. Wird z.B. später ein Konturelement ohnehin überfräst, kann die Schnittqualität geringer sein, der Vorschub über die Qualitätsvorgabe höher. Die Gesamtbearbeitungszeit des Auftrages wird dadurch deutlich reduziert.

Mit einer geeigneten Wasserstrahlschneidanlage kann der gesamte Schneidvorgang sensorüberwacht mannos stattfinden, beim Unterwasserschnitt auch

Mittels einer geeigneten Präzisionswasserstrahlschneidanlage kann die Herstellung der Antriebswagenplatten erheblich vereinfacht und auch qualitativ verbessert werden. Zunächst einmal können die Teile deutlich enger verschachtelt werden, da kein thermischer Einfluss größere Teileabstände erfordert. Der minimale Teileabstand beim Wasserstrahlschneiden liegt in diesem Beispiel zwischen 3 - 8 mm zueinander (automatisch ermittelt ohne Gefahr das Nachbarteil zu beschädigen), beim Brenn- bzw. Plasmaschneiden rd. 15 - 20 mm (teils manuell über Erfahrungswerte einzustellen).

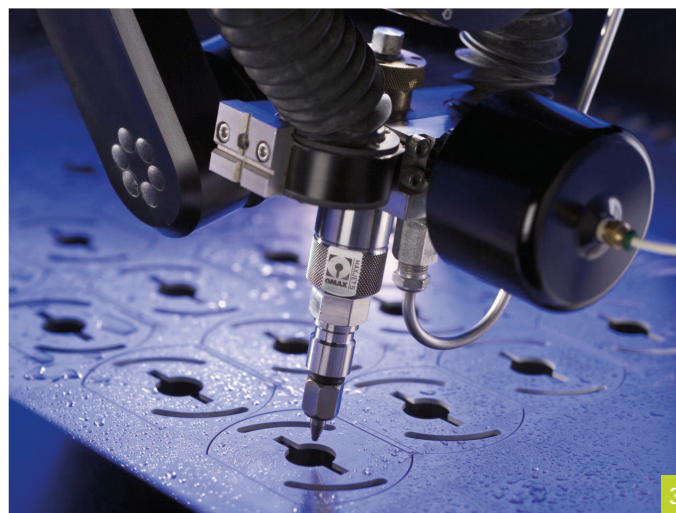
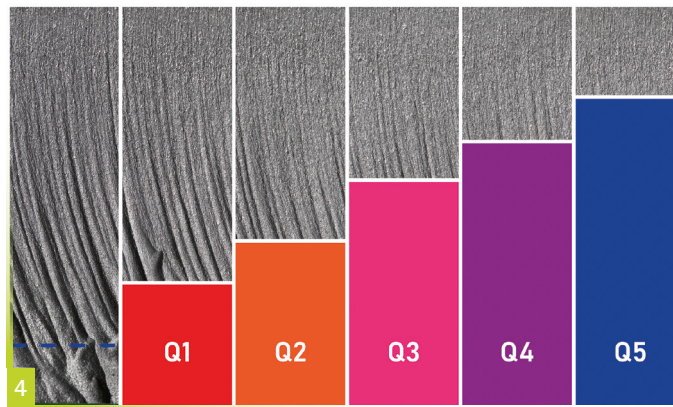


Abbildung 3
Werkbild OMAX - Schwenkkopf TAJ

Abbildung 4

Werkbild OMAX – Schneidqualitäten inkl. Abgrenzung zum Trennschnitt – siehe auch VDI_NCG_Richtlinie 5210, Beuth-Verlag, 2009



ohne störende Wassernebel und Abrasivstäube bei gleichzeitig deutlich niedriger Geräuschentwicklung (man kann ohne Ohrenschutz arbeiten, sofern der Rest der Werkhalle dies auch erlaubt, technisch: < 79 dB(A) - Dezibel Schalldruck).

Die Bauteile für die Antriebswagen stehen den nachfolgenden Bearbeitungsschritten durch Nutzung des beschriebenen Prozesses in optimaler Qualität zur Verfügung (Gewinde und Senkungen einbringen, und z.B. Schleifen und Beschichten).

Vergleicht man nun die konventionelle Fertigungstechnik der Antriebswagen mit der alternativ beschriebenen Methodik ergibt sich eine erhebliche Kostenersparnis bei gleichzeitig höherer Teilequalität. Denn obwohl der Wasserstrahlschnitt oft langsamere Vorschübe erreicht als thermische Schneidverfahren, reduziert man die sonst zusätzlichen personal- und maschinen-intensiven Zusatzschritte deutlich. Die Einsparung für die beiden Bauteile der Antriebswagen liegen bei rd. 30%, und zwar unabhängig davon ob die Werkstücke für die Motorwagen selber hergestellt oder extern bezogen werden.

Dieses Wissen vorausgesetzt motiviert ein Maschinenbauunternehmen durchaus dazu andere Werkstücke / Bauteile auf die alternative Fertigungstechnik zu untersuchen, so dass sich schnell Potentiale für ein eigenes passendes Wasserstrahlschneid-

system ergeben und gleichzeitig die interne Flexibilität erhöht wird.

Weitere Anwendungen / Branchen des Präzisionswasserstrahlschneidens aus dem Bereich der Metallbearbeitung finden sich unter anderem im (Stanz-) Werkzeugbau, Betriebsmittelbau und Instandhaltung, Prototypen- und Modellbau, Metall- und Anlagenbau, Blechbearbeitung, zerstörende Materialprüfung, uvm.

Zum Bereich der Metallbearbeitung sei abschließend erwähnt, dass mittels Wasserstrahlschneiden alle Metallsorten bearbeitet werden können, also alle Edelmetalle und Baustähle, Werkzeugstähle aller Legierungen, Buntmetalle wie Messing und Aluminium und das in nahezu allen Materialstärken. In vielen Fällen kommen die zum Teil konkurrierenden Verfahren wie Laser-, Plasma- und Brennschneiden aber auch die Funkenerosion an ihre jeweiligen Grenzen, entweder technologisch oder wirtschaftlich.

Wasserstrahlschneiden von Schwermetallen (Blei, Molybdän, ...) sowie Legierungen mit höheren Anteilen von Schwermetallen (z.B. Kupfer) funktioniert genauso wie bereits beschrieben. Allerdings gelten hier - wie bei den anderen Bearbeitungsverfahren aber auch - deutlich verschärfte Umweltbedingungen, welche in jedem Einzelfall zu betrachten und ggf. mit den lokalen Umweltbehörden und Entsorgern abzustimmen sind, insbesondere bei der Serienfertigung. Im

Bereich Wasserstrahlschneidanlagen kann hier auf ganz spezielle Erweiterungsmodulare wie Wasseraufbereitungs- und Wasserkreislaufsysteme sowie Anlagen zum Abrasivschlammrecycling zurückgegriffen werden.

Da Wasserstrahlschneiden nahezu alle Materialien bearbeiten kann, betrachten wir jetzt das Spektrum der zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten im Fahrzeugbau (Luftfahrt, Automobil, Schienen- und Baufahrzeuge, Schifffahrt bis hin zu Anwendungen im Bereich Weltraum (Satelliten, Raketen, ...) sowie Meeres- und Polarforschung (U-Boote, Greifer und weiteres Zubehör)). Neben den unterschiedlichsten Metallen werden Kunststoffe aller Art, sowie Glas und viele unterschiedliche Elektronik- und Elektrobauteile benötigt. Auf Grund der sehr hohen Komplexität dieser Fahrzeuge ist es kaum möglich einzelne Bauteile, Materialien oder Arbeitsschritte an dieser Stelle zu beleuchten.

Es sind häufig Einzelteile, Klein- und Großserien in höchster Qualität herzustellen, wobei dann die Wasserstrahlschneidtechnik längst als etablierte Technologie die wirklich einzig Sinnvolle im Bereich des Konturschneidens bleibt. An dieser Stelle seien beispielhaft einige Branchen / Anwendungen erwähnt: Konturschneiden mit CFK und GFK (Leichtbau für alle Fahrzeuge), Glaskonfektionierung (Optik, Möbel, Industrie), Keramik und Naturstein (insbesondere bei Baunebengewerken), technische Keramiken (Industrie) bis hin zu metallischen und nichtmetallischen Dichtungen.

Abschnitt B: Merkmale von Wasserstrahlschneidensystemen

Moderne Wasserstrahlschneidanlagen werden oft durch sogenannte Systemintegratoren angeboten. Dabei werden Schneidbecken, Hochdruckpumpe, bewegliche Schneidköpfe, Nebenaggregate und Steuerungssoftware unterschiedlicher Hersteller von einem Lieferanten zusammengestellt. Die einzel-

nen Komponenten werden über Schnittstellen einander zugeordnet, ein Verlust an Effektivität und Verantwortlichkeiten tritt nicht selten ein.

Im besten Fall aber wird durch einen Kompletthersteller bzw. dessen zertifiziertem lokalen Exklusiv-Vertreter geliefert und betreut, da alle einzelnen Systemkomponenten inklusive der Steuerungssoftware sowohl technisch als auch wirtschaftlich in einander greifen. Damit kann auch der Service für alle Module aus einem Hause kommen – es gibt nur einen Ansprechpartner für alle Themen, und keine Verweise auf andere mögliche Dienstleister und Verantwortliche. Dieser eine Ansprechpartner sorgt i.d.R. dafür, dass bereits am Folgetag nach einer potentiellen Störungsmeldung alle Probleme gelöst sind, und keine unnötig längeren Maschinenausfälle zu beklagen sind.

Meist werden Windows-basierende PC-Steuerungen genutzt. Dabei verlangen einige Anbieter mehrere tausend Euro für zusätzliche Software-Kopien/-Lizenzen, auch für Software-Updates werden wiederum tausende Euro pro Lizenz verlangt. Aber auch hier gibt es namhafte Komplettanbieter, bei denen die meist jährlich erscheinenden Software-Updates auf Lebenszeit der Anlage kostenlos und bei Bedarf beliebig viele Kopien ohne Berechnung bereitgestellt werden. Dies bietet dann Sicherheit in der Investitionsentscheidung.

Die Maschinenteknik allgemein sowie Nebenaggregate und Zerti-

fikate der Hersteller und Lieferanten (wie z.B. im Maschinenbau selbst und in der Anwenderverantwortlichkeit – CE, ISO 9001, Umwelt) sind bekanntermaßen bei der Auswahl eines Systems möglichst zu betrachten. Je nach Anwendung sind die einzelnen Module auf Herz und Nieren zu prüfen. Dazu haben sich nach einer intensiven Vorauswahl über Internetrecherche und Messebesuche sogenannte Benchmarks sehr bewährt. Die einzelnen Systemintegratoren und Komplettanbieter (aber auch Lohnfertiger) werden besucht – dabei sollten Materialien und CAD Daten bzw. Skizzen einfach mitgebracht werden (und nicht vorher zur Verfügung gestellt, damit keine längere Vorbereitungszeit möglich ist – wie in der Praxis normalerweise auch) – der gesamte Prozess und die Schneidergebnisse können damit bewertet, und miteinander in einer z.B. Vergleichsmatrix zusammengestellt werden.

Soll zum Beispiel eine Serienfertigung durch ein Wasserstrahlschneidsystem hergestellt werden, sind Verfügbarkeit, Sensorik, ERP-Integration wichtige Merkmale. Auch die Upgrade- und Updatefähigkeit für Einsatzzeiten jenseits der 10 – 20 Jahre sind genau zu untersuchen.

Vielleicht geht es aber auch 'nur' um wenige Teile, welche von einschlägigen Dienstleistern nur schwer zu bekommen sind (Stichwort Unabhängigkeit) – trotzdem soll die Anlage sicher und einfach zu betreiben sein.

Bei einer Preisfindung zum Kaufabschluss werden immer

noch gerne Folgekosten und Update- und Upgradefähigkeit insgesamt unterschätzt – es gilt die Zukunftsfähigkeit für Hardware und Software abzusichern – das nächste Windows-Update kommt sicher!



Dipl.-Math. Ralf Winzen

Ralf Winzen schloss sein Studium der Numerischen Mathematik an der Universität Heidelberg 1985 mit Diplom ab. Als Vertriebsleiter im Bereich CAD/CAM/CAE/GIS war er national und international bei zwei namhaften deutschen Unternehmen dieser Branche unterwegs. Seit 2003 leitet er Vertrieb & Marketing für OMAX Wasserstrahlschneidanlagen bei der INNOMAX AG, D-41199 Mönchengladbach, ab 2010 als Prokurist. Von Beginn an ist Herr Winzen beim AWT und anderen Arbeitskreisen aktiv dabei.
Kontakt: r.winzen@innomaxag.de

Entwicklung und Perspektiven des Micro-Wasserstrahlschneidens

Herstellung miniaturisierter und feinmechanischer Bauteile

Das Trennverfahren „Wasserstrahlschneiden“ konnte sich im industriellen Einsatz einen festen Platz erobern. Industrielle Anlagen sind in ihrer Genauigkeit jedoch auf etwa $\pm 0,1$ mm begrenzt. Deshalb entwickelte das Schweizer Unternehmen Waterjet AG ab 2001 eine Micro-Wasserstrahlschneidtechnologie, die höhere Genauigkeitsanforderungen erfüllen kann. Intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eröffnen diesem Spezialverfahren seitdem immer neue Einsatzfelder.

Den Startschuss zur Entwicklung einer neuen Generation von Hochpräzisionsanlagen für das Wasserstrahlschneiden gab eine 2001 einsetzende Krise. Diese gab beim Wasserstrahlschneiddienstleister Waterjet AG in Aarwangen (Schweiz) den Anstoß, lange gehegte Pläne für die Schaffung einer grundlegend verbesserten Anlagentechnik umzusetzen. Der Geschäftsführung war schon lange ein Dorn im Auge gewesen, dass viele lukrative Aufträge nicht angenommen werden konnten, weil die geforderten Genauigkeiten mit den vorhandenen Anlagen nicht eingehalten werden konnten. Da kein kommerzieller Anbieter die gewünschten Spezifikationen gewährleisten konnte, wurde eine eigene Entwicklung ins Auge gefasst. Ziel war eine Microwasserstrahlschneidtechnik, die zehnmal genauer schneiden und um den Faktor 4 schmalere Schlitze erzielen sollte als die bisher verfügbaren Anlagen.

Kleiner, leichter und präziser – die Forderungen der Zukunft

Zudem war abzusehen, dass man damit einem bei industriellen Abnehmern schon länger beobachtbaren Trend folgen würde. In praktisch allen technischen Disziplinen wird von neuen Entwicklungen gefordert, dass diese kleiner und leichter sind und weniger Material und Ressourcen benötigen als bisher. Daher steigen naturgemäß auch die Präzisionsanforderungen bei der Bearbeitung. Die bisher verfügbaren Anlagen waren vor allem mit Blick auf möglichst hohe



Schneidleistung entwickelt worden. Sie wiesen typischerweise Düsendurchmesser von 0,8 mm auf und ihr Kopf positionierte auf etwa $\pm 0,05$ - $0,1$ mm genau. Die damit hergestellten Teile erreichten daher in der Regel lediglich Maßtoleranzen in der Größenordnung von $\pm 0,1$ mm. In dieser Situation experimentierte Waterjet zunächst mit einer selbst konstruierten Anlage mit einer CNC-gesteuerten Achsmechanik, deren Wegmesssystem eine Auflösung von ± 6 μ m hatte. Auf dieser wurde mit feineren Düsendurchmessern zwischen 0,5 bis 0,17 mm experimentiert. Schnell zeigte sich jedoch, dass das gesteckte Ziel nicht ohne professionelle Hilfe durch eine Hochschule zu realisieren gewesen wäre.

Eine eigene Forschungsabteilung

Das jetzt angestoßene Entwicklungsprojekt erforderte von Beginn an auch Investitionen in entsprechend qualifiziertes Personal. Deswegen baute Waterjet bereits mit der Bildung des Teams zur Entwicklung der Micro-Wasserstrahlschneidtechnologie auch den Kern einer Forschungs- und Entwicklungsabteilung auf. Dieser für eine relativ kleine Fir-

ma ungewöhnliche Schritt wurde als unumgängliche Investition in die Sicherung der Zukunft des Betriebs und damit des Erhalts der Arbeitsplätze gewertet.

Zu dieser Forschungsabteilung gehören heute drei akademisch ausgebildete Mitarbeiter, denen gut ausgestattete Laborräume mit entsprechender Ausrüstung zur Verfügung stehen. Die Ausstattung umfasst auch zwei eigene Micro-Wasserstrahlschneidanlagen. Auch darüber hinaus verfügt die Abteilung über eine außergewöhnlich breite Palette an Ausrüstungen. Dazu gehören Pumpen mit Drücken bis zu 10'000 bar ebenso wie die Möglichkeit, andere Flüssigkeiten als Wasser zu verwenden, unter Schutzgas zu arbeiten oder ultrafeine Abrasive einzusetzen.

Über Grundlagenforschung hinaus werden hier natürlich auch Lösungen für Aufgabenstellungen aus der betrieblichen Praxis erarbeitet. Dies betrifft sowohl Sonderfälle, die in der Produktion bei Waterjet selbst auftreten, als auch Anfragen, die von Kunden mit eigenen Anlagen an Waterjet herangetragen werden. Dieses Serviceangebot durch ein hoch kompetentes Applikationslabor geht deutlich über das hinaus, was Maschinenhersteller in anderen Bereichen üblicherweise für ihre Kunden zur Verfügung stellen.

Abbildung 1

Dieser knapp 3 mm große Fahrradwinde wurde mit einer Microwaterjet-Wasserstrahlschneidmaschine geschnitten

Entwicklungspartnerschaften mit der Fachhochschule Nordwestschweiz

Zusätzlich zu den eigenen F+E-Aktivitäten beteiligt sich Waterjet auch über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren in enger Zusammenarbeit mit Schweizer wie auch mit internationalen Hochschulen an Forschungsprojekten. Schon bei einem Projekt zur Erstellung von Bohrungen in Turbinenschaufeln mithilfe des Wasserstrahlschneidens war es zu einer ersten Zusammenarbeit mit dem Kompetenzzentrum für Wasserstrahltechnologie der damaligen Fachhochschule Aargau (heute Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW) in Windisch gekommen. Schon damals wurde bei der damaligen Kommission für Technologie und Innovation (KTI, heutige Nachfolgeorganisation ist Innosuisse) eine Förderung beantragt und gewährt. Diese Kontakte erwiesen sich als wertvoll, nachdem erkannt wurde, dass man bei der Entwicklung der ins Auge gefassten neuen Technologie auf zusätzliche externe Hilfe angewiesen sein würde. Prof. Dr. Kurt C. Heiniger bewährte sich bis zu seinem tragischen Unfalltod als ebenso engagierter wie kompetenter Begleiter des Vorhabens.

Die ersten Maschinen (Generation F1) wurden noch in herkömmlicher Weise als Schweißkonstruktion ausgelegt. Erster wesentlicher Entwicklungsschritt war die Verwendung eines im Vergleich zum Stand der Technik deutlich genaueren, in die Achsen integrierten induktiven Messsystems mit einer Messauflösung



Abbildung 2
Die allererste Microwasserstrahlschneidmaschine WOMAJET Typ F1 ist auch heute noch im Einsatz

von 6 µm. Zwar konnten mit dieser Entwicklung die gesetzten Ziele noch längst nicht erreicht werden, doch eigneten sich diese Anlagen immerhin bereits für die Ausführung von Aufträgen, die mit bisherigen Systemen nicht hätten bewältigt werden können. Ohne diese sehr früh parallel zur weiteren Entwicklung einsetzende Wertschöpfung wäre es Waterjet nicht möglich gewesen, eine derartig langdauernde Entwicklung finanziell zu bewältigen. In den folgenden vier Jahren bis 2005 wurden noch zwei weitere Generationen entwickelt. Anlagen des Typs F2 verfügten bereits über inkrementell messende Glasmessstäbe mit wesentlich höherer Auflösung, die bei Generation F3 durch absolut messende Ausführungen ersetzt wurden.

Als weiterer entscheidender Faktor wurde im Rahmen der Zusammenarbeit mit der FHNW insbesondere das Strömungsverhalten des Strahls nach dem Passieren der Austrittsdüse erkannt, Abbildung 3. Dies beeinflusst die Aufnahme der in der Mischkammer zugeführten

Schneidstoffpartikel in den Strahl sowie ihre Beschleunigung im Fokussierrohr in Richtung Werkstück. Auch die Eigenschaften, die Größe und die Form der zugemischten Mineralpartikel spielen eine wichtige Rolle. Sie schneiden umso wirksamer, je härter, eckiger und scharfkantiger sie sind. Weiteres Kriterium ist ihre Verteilung im Strahl: Hohe Schneidleistung wird am besten erreicht, wenn die Partikel in der Mitte des Wasserstrahls beschleunigt werden. Werden sie dagegen eher am Umfang des Strahls mitgerissen, dann bilden sie den Durchmesser des Fokussierrohrs auf dem Werkstück besser ab. Das verringert zwar geringfügig die Schneidleistung, erhöht aber im Gegenzug die Kantenschärfe. Gleichzeitig verringert dies auch die Rauigkeit der Trennfläche.

... und mit dem Maschinenhersteller Daetwyler

Selbst mit dem Modell F3 wurde das selbst gesteckte Genauigkeitsziel noch nicht gänzlich erfüllt. Für die weitere Entwicklung wurden deshalb zusätzlich Profis aus den Bereichen Werkzeugmaschinenbau und Schaltschrank- bzw. Steuerungsbau hinzugezogen. Mit der Generation F4 wurde die nicht ausreichend steife Konstruktion des Maschinenbetts durch eine Mineralguss-Ausführung ersetzt. Ein verbessertes Messsystem liefert absolute Positionsdaten mit einer Auflösung von 10 nm. Damit erreichen die Achsen der Generation F4 eine Positioniergenauigkeit von ± 0,5 µm. Zusammen mit der Kompensation der patentierten Rundheitsabweichungen des

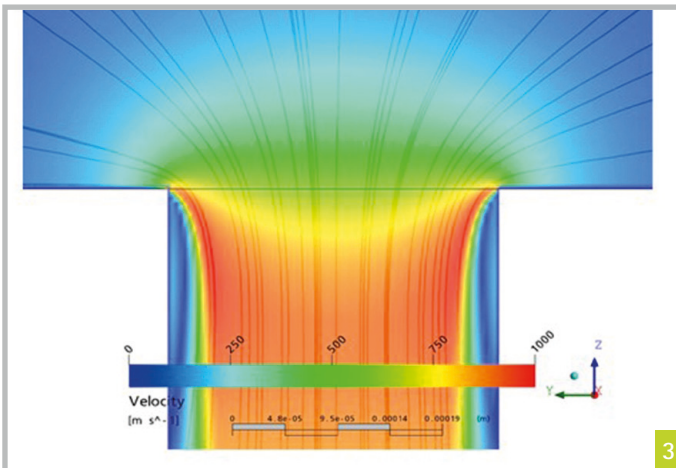


Abbildung 3
Geschwindigkeitsverteilung des Wasserstrahls im Bereich der Düse (Grafik: FHNW)

Strahls konnten dann $\pm 3 \mu\text{m}$ erreicht werden. Letztlich wurden so Maschinen- und Prozessfähigkeiten $\text{cpk } 1,33$ gewährleistet. Mit diesen Anlagen können Teile innerhalb eines Toleranzbandes $< \pm 0,01 \text{ mm}$ prozesssicher gefertigt werden.

Zeitliche Entwicklung der Gesamtprozesskette

Für diesen Erfolg brauchte es allerdings noch viel mehr als nur perfekten Maschinenbau mit zuverlässiger Mechanik und moderner Steuerung. Auch die Verringerung des Strahldurchmessers und die Steigerung der Weggenauigkeit der Maschine allein reichten nicht aus. Im komplexen Prozess „Wasserstrahlschneiden“ wirken Fluidodynamik, Mechanik, Wegmesstechnik, Mineralogie und pneumatische sowie mechanische Fördertechnik auf sehr vielfältige Weise zusammen. Jeder dieser Aspekte musste sorgfältig untersucht werden. Auch hier wurde über Jahre hinweg, teils in Kooperation mit externen Partnern, umfassende Pionierarbeit geleistet. Im Einzelnen waren dies:

- Ab 2002 Realisierung einer ersten Versuchsanlage (die auch jetzt noch bei der FHNW in Windisch im Einsatz steht)
- Ab 2003 Entwicklung der Maschinengenerationen F1, F2 und F3 mit der Bezeichnung WOMAJET
- Ab 2003 Entwicklung des Schneidsystems SK 11, das eine gleichmäßigere Kornverteilung des Abrasivs im Strahl ermöglichte
- Ab 2004 Entwicklung der Anlagensteuerung Micro Water Jet Tool zusammen mit dem externen Partner MBC. Hier wurde das gesamte Erfahrungswissen über Strahlerzeugung und Schnittparameter integriert
- Ab 2004 Entwicklung eines Schwenkkopfs für Fünfbearbeitung zusammen mit externen Partnern
- Ab 2005 Entwicklung eines vom Becken getrennten und daher erschütterungsfreien Auflagerahmens
- Ab 2006 Entwicklung einer Rotationsachse für das Bauteil, so dass eine Art Drehbearbeitung möglich wurde
- Ab 2006 Entwicklung eines mechanisch einstellbaren Präzisionshalters für den Schneidkopf, um Winkelfehler des Schneidstrahls ausgleichen zu können
- Ab 2007 Entwicklung eines präziseren Dosiersystems für Abrasive, einstellbar von 30 - 200 Gramm/min
- Ab 2008 Entwicklung der aktuellen Maschinengeneration (Microwaterjet F4) mit dem Partner Daetwyler AG
- 2008 Realisierung einer ersten Doppelkopfanlage mit zwei verstellbaren Schneidköpfen auf einer Achse
- Ab 2010 Ergänzung der Wasserstrahl-Bearbeitung um eine mechanische Bearbeitung durch Kombination mit einer NC-gesteuerten Hochgeschwindigkeitsbohrachse (bis 50.000 rpm)
- Ab 2011 4D-Simultanbearbeitung von Bauteilen mithilfe einer zusätzlichen NC-gesteuerten Drehachse
- Ab 2011 Einsatz von Robotern zur Automatisierung. Dabei kann wahlweise das Werkstück oder der Schneidkopf vom Roboter geführt werden
- Ab 2011 wurde zusammen mit der ETH Zürich untersucht, wie weit die Oberflächenstrukturierung von metallischen Kieferimplantaten durch Wasserstrahlbearbeitung das Einwachsen in den Kiefer fördern kann [2]
- Ab 2012 fanden gemeinsam mit dem Paul-Scherrer-Institut Versuche zur Ermittlung der räumlichen Verteilung und der Geschwindigkeit der Abrasivpartikel im Wasserstrahl mithilfe von Röntgenstrahlung statt
- Ab 2015 Experimentelle Erprobung der Wirkung spezieller Additive im Strahlwasser

- Ab 2018 wurde gemeinsam mit der ETH die Wirkung von Ultraschall auf die Durchmischung von Wasserstrahl und Abrasivstoff untersucht
- Ab 2019 Entwicklung spezieller Abrasivstoffgemische für höchstpräzise Schnitte bei bester Schnittkantenqualität und minimaler Oberflächenrauheit

Weitere Anlagentypen

Auch darüber hinaus wurden zahlreiche externe Entwicklungen in wechselnden Beteiligungen zusammen mit der FHNW, der Inspire AG (einem Spin-Off der ETH Zürich) beziehungsweise dem Paul-Scherrer-Institut durchgeführt. Die Zusammenarbeit mit der ETH begann 2015, als diese für ihren Eigenbedarf eine kleinere Microwasserstrahl-Schneidanlage benötigte. Diese C4-Anlagen eignen sich ideal für Forschungseinrichtungen, weil sie die gleichen Eigenschaften haben wie die industrielle F4, aber nur halb soviel Platz im Labor in Anspruch nehmen. Als neueste Entwicklung kommen im Jahr 2022 großformatige Microwasserstrahlschneidanlagen auf den Markt. Diese C5-Maschinen haben einen Arbeitsbereich von $2.000 \times 1.000 \text{ mm}$ und erreichen die gleiche Genauigkeit wie die anderen Systeme.

Forschungsprojekte auf europäischer Ebene

Zu den Highlights der Forschungsk Kooperationen von Waterjet zählt die Beteiligung an drei europäischen Forschungsprojekten. Dies waren jeweils Großprojekte unter Beteiligung zahlreicher Firmen und wissenschaftlicher Institutionen aus verschiedenen europäischen Ländern.

Conformjet-Projekt der EU – der Schritt zum 3D-Fräsen mit Wasser

Der volle Titel dieses Projekts lautete „Self-learning Control System for Freeform Milling with High Energy Fluid Jets.“ Projektstart war 2009. Im Rahmen des Projekts sollte untersucht werden, ob der Wasserstrahl

– der bisher ausschließlich als Schneidmedium zum Einsatz kam – ähnlich wie das Fräsen auch zum gezielten Materialabtrag bis zu einer vordefinierten Tiefe eingesetzt werden könnte. Schließlich gibt es zahlreiche harte und spröde Werkstoffe, die sich mit den gängigen Verfahren wie Fräsen oder Bohren nicht oder nur schlecht bearbeiten lassen. Auf der anderen Seite gibt es auch weiche Materialien, die nicht sicher gespannt werden können. Ziel des Projekts war die Klärung der Machbarkeiten und Möglichkeiten dieser Technologievariante. Voraussetzung war die Ermittlung von Technologien, mit deren Hilfe die Wirkung des Schneidstrahls auch in die Tiefe des Materials hinein sicher beherrscht werden konnte. Hierfür wurde auch eine spezialisierte Steuerung entwickelt, Abbildung 4. Nach derzeitigem Stand der Forschung sind die damit zusammenhängenden Aufgabenstellungen im Prinzip lösbar. Damit ist das Verfahren auch für Arbeitsgänge wie Schleifen, Bohren, Gravieren oder die Bearbeitung von Oberflächen einsetzbar. Zu den Zielen des Projekts gehörte auch zu klären, wieweit ein weitgehend mannloser Einsatz des Verfahrens möglich sein würde. Projektbeteiligt waren neun Partner, darunter neben der FHNW und der Firma Waterjet auch die Universität von Nottingham [4], die auf internationaler Ebene zu den Spitzenforschungseinrichtungen gehört.

Am 21.10.2013 fand bei Waterjet ein Symposium über den aktuellen Sachstand des Projekts statt. Hier informierten sich im Beisein eines Beauftragten der EU-Kommission Wissenschaftler der verschiedenen Partner, um sich über den aktuellen Sachstand zu informieren und ihre eigenen Ergebnisse zu präsentieren.

EU-Projekt STEEP

STEER steht für „A Synergetic Training Network on Energy beam Processing: from Modelling to Industrial Applications.“ Start war 2013. Zu den zehn Partner gehörten von Schweizer Seite

neben Waterjet auch noch die Eidgenössische Materialprüfungsanstalt EMPA.

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedenste Verfahren des Materialabtrags wie Ionenstrahl, Laser- oder Wasserstrahlbearbeitung vergleichend untersucht und beurteilt. Zu den Zielsetzungen gehörte auch die mathematische Modellierung der Vorgänge sowie die Umsetzung in geeignete Steuerungskonzepte. Im Rahmen dieses Projekts leistete auch die Forschungsabteilung von Waterjet wichtige Beiträge, unter anderem durch Betreuung von Teilprojekten und Studienarbeiten verschiedener Partner im Labor von Waterjet in Aarwangen.

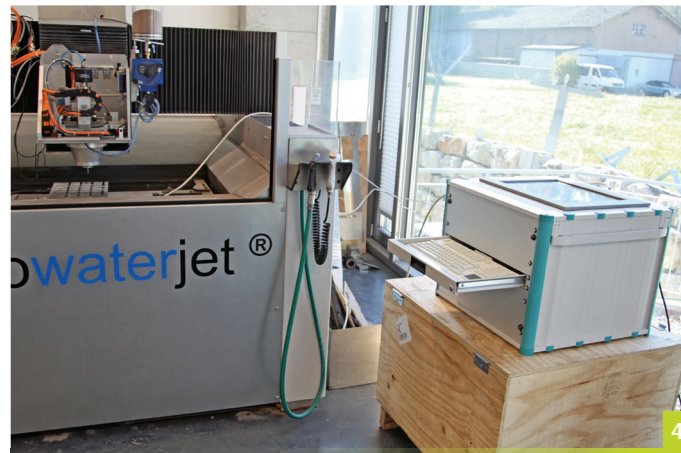


Abbildung 4
Die im Rahmen des EU-Projekts Conform-Jet entwickelte Steuerung ermöglicht ein "Dreiachs-Fräsen" mit dem Wasserstrahl

EU-Projekt STIMULANT

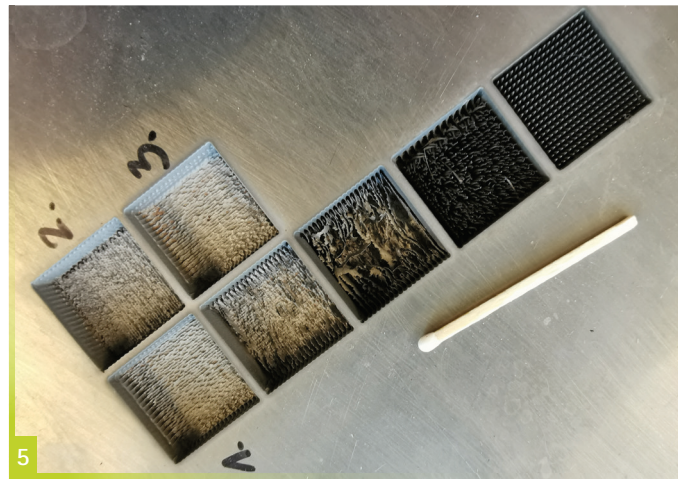
Zusammen mit der Universität Nottingham sowie einer Reihe weiterer industrieller Partner ist Waterjet auch am EU-Forschungsvorhaben STIMULANT (Surface Integrity Conscious High-Performance Hybrid Machining for Safety-Critical Superalloy Aeroengine Parts [1], [3]) beteiligt. Beteiligt waren insgesamt fünf Partner, davon neben Waterjet noch ein weiteres Schweizer Unternehmen, das im Bereich Lasertechnik tätig ist. Dieses Vorhaben ist Teil der 2008 gestarteten Clean SKY-Initiative der EU, mit der die europäische Raumfahrt umweltfreundlicher und leistungsfähiger gemacht werden soll. Konkret geht es um Verfahren zur Bearbeitung von

Hightech-Luftfahrtwerkstoffen mit innovativen Verfahren wie dem Wasserstrahl- oder Laserschneiden.

Aktueller Stand der Technik

Mit der Entwicklung der aktuellen Baureihe F4 konnten die Ziele des ursprünglichen Entwicklungsvorhabens betriebssicher erreicht werden. Ihre Achsen erreichen eine Positionsgenauigkeit von $\pm 0,5 \mu\text{m}$. Der ebenfalls mehrfach überarbeitete Strahlkopf erreicht bei einem Strahldurchmesser von 0,2 mm je nach Randbedingungen eine radiale Abweichung von bis zu $\pm 1,5 \mu\text{m}$, so dass die nominelle Endgenauigkeit bis zu $\pm 2 \mu\text{m}$ betragen kann. Eine wesentliche Rolle spielt auch die Steuerung, die selbst entwickelte

Funktionalitäten wie eine Korrektur von Rundheitsabweichungen des Strahls sowie eine Kontrollmöglichkeit für den Strahlmitedurchsatz beinhaltet. Mit diesen Maschinen ist das Microwasserstrahlschneiden mit Genauigkeiten bis $10 \mu\text{m}$ bei Schlitzbreiten bis herab zu 0,2 mm sicher beherrschbar. Je nach Material und Schnittbreite können Schnittflächenrauheiten bis herab zu Ra 0,5 μm erreicht werden. Aufgrund der zahlreichen Parameter und Randbedingungen erfordert das Einfahren neuer Prozesse jedoch Personal mit Erfahrung, Sorgfalt und Gewissenhaftigkeit. Deshalb legt Waterjet größten Wert auf die Bereitstellung umfassender Unterstützungsleistungen für seine Kunden, ganz unabhängig davon, ob es lediglich um Schneid-Dienstleistungen oder

**Abbildung 5**

Nicht fräsbar: Gezielt aus einem massiven Block herausgearbeitete Oberflächenstrukturen

um den Kauf von Maschinen geht. Die Bandbreite bei der Ausführung von Schneidaufträgen reicht vom Forschungsprototyp über die Kleinserie bis zur Großserie. Falls der Kunde eine eigene Produktion aufbauen möchte, wird die erforderliche Anlage entweder als Einzelmaschine oder auf Wunsch auch mit erforderlicher Automation geliefert. Je nach Vereinbarung wird dabei auch das komplette Einfahren des Produktionsprozesses bis zur Serientauglichkeit abgedeckt. Entscheidend ist hierbei, dass man dem Kunden in jeder Situation mit dem gesamten im Hause angesammelten Knowhow zur Seite steht. Dabei kümmert man sich um alle Aufgabenstellungen von der Beratung bei neuen Produktentwicklungen bis zur Bereitstellung von Reservekapazität bei Pannen oder Engpässen. Die weiterhin kontinuierlich betriebene eigene Forschung gewährleistet hierbei, dass dieser Service stets auf dem neuesten Stand der Technik ist. Hinzu kommt das inzwischen weiterentwickelte Knowhow im Bereich der gezielten Abtragung und Oberflächenbearbeitung, Abbildung 6. Ein weiteres hochinteressantes Einsatzgebiet der Microwasserstrahltechnologie ist die Verbesserung der Bauteileigenschaften durch Strahlhämmern. Die so verdichtete Oberfläche verbessert dank der induzierten Druckeigenspannungen insbesondere die dynamische Belastbarkeit von schwingungsbeanspruchten Bauteilen.

Abbildung 6

An solchen Präparaten lässt sich die Verbindung des Implantats mit dem Knochen viel besser untersuchen als an Proben, die durch Fräsen oder Schleifen hergestellt wurden

Fortschritte für die Medizintechnik

Der Bereich Medizintechnik, wo viele empfindliche Hightech-Werkstoffe mit schonenden Verfahren geschnitten und teils auch weitergehend bearbeitet werden müssen, gehört zu den interessantesten Zukunftsmärkten für das Microwasserstrahlschneiden. Auf diesem Gebiet nimmt die Schweizer Medtech-Forschung dank zahlreicher bahnbrechender Entwicklungen einen Platz in den vorderen Rängen ein. In diesem Bereich ist Waterjet bereits seit vielen Jahren maßgeblich an wichtigen Entwicklungen beteiligt. So zertrennt der Wasserstrahl nicht nur Metalle und Keramik, sondern auch Knochen und Gewebe sauber, gratfrei und mit hoher Effizienz, Abbildung 5. Bei Verwendung von Reinwasser entstehen auch keine Oberflächenanhaftungen von Schneidstoffen, welche die Biokompatibilität beeinträchtigen könnten. Auch lassen sich mit dem Wasserstrahl entnommene Knochenteile in kleine Stücke zerschneiden, welche dann im Rahmen von Knochenrekonstruktionen nach komplizierten Brüchen implantiert werden können. Ein weiteres potenzielles Einsatzgebiet ist das Einwachsen von Zahnimplantaten z.B. im Kieferbereich. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde die Oberfläche von Implantaten mithilfe des Wasserstrahls gezielt mit winzigen Vertiefungen versehen. In diese Vertiefungen wurden anschließend kleine Körnchen aus einem Material eingelagert,

welches das Zusammenwachsen mit dem Knochen fördert.

Förderung der Technologie und Verbandsarbeit

Waterjet ergriff auch im Bereich der Förderung der Branchen- und Verbandsarbeit eigene Initiativen. Auf einer am 24.9.2008 in Aarwangen organisierten Veranstaltung präsentierten Forschungseinrichtungen sowie Firmen wie Bystronic in einem eigens errichteten Zelt ihre Aktivitäten sowie Ergebnisse ihrer Forschungsarbeiten und diskutierten dabei auch über Fragen der Normung. Zu den Gästen gehörte auch die in Deutschland ansässige NC-Gesellschaft.

Waterjet ist Mitglied der European Waterjet Cutting Association (EWCA). Am 23. Mai 2013 war das Unternehmen Veranstalter eines EWCA-Symposiums mit rund 70 Teilnehmern in Aarwangen. Geboten wurde ein dichtes Vortragsprogramm mit Themen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft.

Im Trend der Zeit: Energie sparen mit einer Pumpenkaskade

Zu den internen Entwicklungsprojekten von Waterjet gehörte auch schon seit 2009 eine Steuerung, mit der zahlreiche Microwaterjet Anlagen gemeinsam von einer kaskadierten Gruppe von Hochdruckpumpen aus fünf verschiedenen Leistungsklassen versorgt wurden. Diese Hochdruckpumpen müssen das Wasser für die Schneidanlagen auf 4'000 bar Druck bringen. Das kostet viel Energie und macht sie zu den größten Stromfressern im Unternehmen. Eine Pumpe, die mehrere Maschinen versorgt, muss so groß ausgelegt werden, dass sie auch den Maximalbedarf deckt, wenn alle angeschlossenen Anlagen gleichzeitig Wasser



benötigen. Je größer jedoch die Pumpe, desto unwirtschaftlicher ist sie im Teillastbetrieb.

Für 18 der insgesamt 32 Schneidsysteme, die bei Waterjet im Einsatz sind, wurde deshalb eine gemeinsame Zentralversorgung entwickelt. Diese besteht aus fünf verschiedenen großen Pumpen, die zusammen eine Sammelleitung für alle angeschlossenen Maschinen versorgen. Wird nur wenig Wasser benötigt, dann laufen nur diejenigen der kleineren Pumpen, deren Leistung für den aktuellen Bedarf ausreicht. Erst wenn mehr Wasser benötigt wird, erhalten nach und nach auch die größeren Einheiten den Marschbefehl.

Als zusätzliche Raffinesse arbeiten auch die Microwasserstrahlschneidsysteme mit einer speziellen Look-ahead-Funktion, die feststellt, wie hoch in den nächsten Minuten ihr jeweiliger Bedarf sein wird. Diese Information wird gebündelt an die Kaskadensteuerung der Pumpen weitergeleitet, die dann die einzelnen Einheiten rechtzeitig zu- oder abschaltet. Das sehr erfreuliche Ergebnis der Entwicklung war eine glatt halbierte Stromrechnung. Da es sich bei den meisten der angeschlossenen Wasserstrahlschneidsystemen um Microanlagen handelt, die bereits dank ihrer kleineren Düsen weniger Energie verbrauchen, ist die Gesamteinsparung sogar nochmals deutlich höher.

Weitere Entwicklungspfade: Wie weit wird die Miniaturisierung noch gehen?

Natürlich stellen viele Kunden die Frage, ob bzw. wie es mit der Miniaturisierung des Wasser-

strahlschneidens weitergehen wird. Tatsächlich wird auch in dieser Richtung weiter geforscht. Auch wurden bereits entsprechende Komponenten entwickelt. Die Hürden sind allerdings hoch, da hierfür erheblich feineres Abrasivmaterial eingesetzt werden muss. Dies bedingt eine deutlich geringere Abtragraten, da die kleineren Abrasivpartikel entsprechend weniger kinetische Energie übertragen können. Es ergibt sich eine ähnliche Situation wie bei der Laserbearbeitung: Mit sogenannten Femtosekundenlasern lassen sich bekanntlich wesentlich feinere Bearbeitungen durchführen als mit den heute in der Industrie üblichen Systemen, doch sind auch hier die Abtragsraten so gering, dass der Markt für entsprechende Anwendungen begrenzt ist. Ob und wann es einen Marktdurchbruch für eine Ultramicrowasserstrahlschneidtechnologie geben wird, lässt sich derzeit noch nicht abschätzen.



Walter Maurer

Walter Maurer wanderte nach seiner Ausbildung zum Elektromechaniker nach Südafrika aus und stieg dort schnell zum Instandhaltungsleiter einer großen Textilfabrik auf. Nach seiner Rückkehr leitete er die Spezialglasfertigung eines bekannten Schweizer Glasherstellers. Im Jahr 1989 machte er sich mit einer eigenen Firma im Bereich Wasserstrahlschneiden selbstständig und entwickelte dort das Micro-Wasserstrahlschneiden. Kontakt: maurer@waterjet.ch

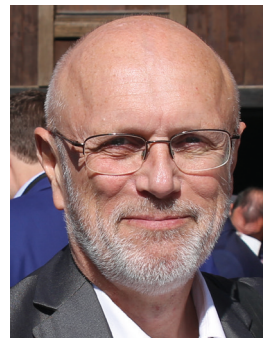
Referenzen:

[1] Zhiron Liao et al., *Bi-process Abrasive Waterjet Machining – A Method for Machining and surface Modification of Nickel Based Superalloy*. EUROMAT conference: Stockholm, 2020.

[2] R. Schumacher et al., *SINAPIS – Slurry injection of nano-scale particles into implant surfaces*. Proceedings of SNI annual meeting 2016, Lenzerheide, 2016.

[3] Zhiron Liao et al., *Dual-Processing by Abrasive Waterjet Machining – A Method for Machining and Surface Modification of Nickel Based Superalloy*. Journal of Materials Processing Tech, 2020.

[4] Zhiron Liao et al., *Influence of surface integrity induced by multiple machining processes upon the fatigue performance of a nickel based superalloy*. International Journal of Fatigue, 2021.



Dipl.-Ing. Klaus Vollrath

Dipl.-Ing. Klaus Vollrath erwarb sein Diplom am Institut für Metallkunde und Metallphysik der RWTH Aachen. Darauf folgten sieben Jahre Forschungstätigkeit und zehn Jahre Vertriebs- und Führungsverantwortung in der Industrie. Nach mehreren Jahren als Chefredakteur der „Giesserei“ ist er seit 1997 als freiberuflicher Wissenschaftsjournalist und Unternehmensberater tätig. Kontakt: kvollrath@bluewin.ch

Prozess Integration bei der Behälter- Innenreinigung

Aktueller Stand der Technik und Entwicklungspotentiale

Neue Produktionsverfahren, höhere Anforderungen an die Produktreinheit und auch an die Humanität der Arbeitsplätze fordern neue Wege bei der Reinigung. Behälter, Reaktoren und Autoklaven, vor allem in der chemischen Industrie, innen zu reinigen, ist eine wesentliche Herausforderung. Die Reinigung mit Hochdruckwasser kommt den Anforderungen der Industrie auf breiter Basis entgegen und hat sich als Reinigungsverfahren etabliert.

Die Innenreinigung von Reaktoren und Autoklaven in der produzierenden Industrie ist seit vielen Jahren eine der wesentlichen Herausforderungen für einen kontinuierlichen und sicheren Anlagenbetrieb in allen Branchen. Die nachfolgenden Überlegungen stehen daher im Sinne einer humanen und ökologischen Erfüllung dieser Aufgabe. Dabei sollen wirtschaftliche wie technische Aspekte bedacht werden.

Notwendigkeit zur Reinigung

Grundsätzlich stellt sich natürlich die Frage, warum wir überhaupt reinigen. Ist das nicht ein überflüssiger und noch dazu zeit- und kostenintensiver Prozess, auf den wir lieber verzichten würden? Mit schmutzabweisenden und selbstreinigenden Oberflächen, zum Beispiel mit Beschichtungen auf Basis des Lotus-Effekts, existieren zwar gute Lösungsansätze, diese bieten jedoch lediglich unterstützende Wirkung hinsichtlich des Reinigungsprozesses, sind aber kein Ersatz für die Reinigung.

In Produktionsanlagen geht es in erster Linie um die Erhaltung der Nutzung und der Funktionsfähigkeit. Im Grunde genommen ist die Reinigung die Basis für die Nutzung einer Betriebseinrichtung und zwar über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Somit handelt es sich nicht um eine untergeordnete, sondern um eine elementare Aufgabe.

Die konsequente Reinigung kann die Lebenszeit einer Produktionsanlage wesentlich verlängern, so-



wie die Qualität der Erzeugnisse deutlich erhöhen.

Dies wurde bereits in der Antike erkannt: Um die Ställe des Augias weiter nutzen zu können, mussten diese einer grundlegenden Reinigung unterzogen werden. Eine echte Herkulesaufgabe! Die Verschmutzung war immens und konnte auch vom Halbgott Herakles nur mit Unterstützung geleistet werden. Die Arbeit, die Menschen machen sollten, wurde mit Hilfe von Wasser bewältigt: Die Schwemmenmistung der Ställe des Augias mittels Wasserfluten und Höhendifferenz war damit der erfolgreiche Beginn der heutigen Hochdruckreinigung.

Auch heute noch wird mittels Wasser, mal mit mehr mal mit weniger Druck und Menge gereinigt, gewaschen, gespritzt und gestrahlt.

Reinigungsobjekte

Heute sind die Räumlichkeiten technischer und dienen der Produktion, dem Transport oder auch der Lagerung. Die Reinigung aber dient immer noch dem Erhalt der Nutzung durch die Vermeidung von Produktvermischung und Zuwachsen von Anlagenteilen, zum Erhalt des Wirkungsgrads der gesamten Produktionsstätte, zur Verbesserung der Produktqualität und nicht zuletzt zur Erhöhung der Flexibilität in der Produktion.

Neben Gebäuden und Maschinen stehen in erster Linie auch Behälter zur Reinigung an. Die besondere Herausforderung dabei ist deren Innenreinigung. Dabei umfasst der Begriff „Behälter“ letztendlich alle Behältnisse von groß bis klein, von einfach bis komplex: Eimer, Fässer, Container, Transportbehälter, Lagertanks, Reaktoren, Autoklaven etc. Der Schwerpunkt liegt auf industriell-

Abbildung 1
Manuelle, mechanische Reinigung eines
Rührwerkbehälters

len Behältnissen für die Reaktion, Lagerung und den Transport von Produkten.

Reaktoren und Autoklaven stellen auf Grund ihrer Geometrie und ihren Einbauten wie Rührwerke, Heizschlangen, Strömungsstörer etc. besondere Anforderungen an die Innenreinigung. Auch Transportbehältnisse wie IBC Container bis zu Tankfahrzeugen und Eisenbahn-Kesselwagen gehören mit ihren individuellen Ausprägungen zu dieser Kategorie von industriell genutzten Behältnissen.

Die Entwicklung der industriellen Reinigung – eine unbemerkte Revolution

Die manuelle Innenreinigung von Behältern war lange Zeit für Personal und Material mit hohen Risiken verbunden. Zum einen war das Einsteigen mit aufwändigen und zeitraubenden Sicherheitsvorkehrungen und Gerüstbaumaßnahmen verbunden – oder manchmal sogar gar nicht möglich. Zum anderen war die manuelle Beseitigung der Rückstände – auch aufgrund der zu tragenden Schutzanzüge und -masken nicht nur eine große körperliche Anstrengung, sie kostete auch viel Zeit und war im Ergebnis keineswegs befriedigend. Kesselwandbeschädigungen bei innenbeschichteten, teilweise emaillierten Oberflächen waren bei dieser (bergmännischen) Reinigungsmethode praktisch an der Tagesordnung.

Auch alternative Reinigungsmethoden mittels Auskochen mit Säuren, Laugen oder anderen Chemikalien sind sehr langwierig und mit hohem Energieeinsatz verbunden. Die Entsorgung der Reinigungsmedien ist, nicht nur ökologisch betrachtet, ein immer größer werdendes Problem.

Abhilfe schuf ab Mitte der zweiten Hälfte des 20sten Jahrhunderts der Einzug der hydrodynamischen Reinigung, der Hochdruckreinigung. Damit ließen sich selbst harte Ablagerungen wie Kesselstein, aber auch Kunstharze und Kunststoffdispersionen,

Chlorkautschuk, Polystyrol, Natur- und PVC-Latex und ähnliche Materialien entfernen. Auch das zweite Problem der Entsorgung war mit dieser Reinigungsmethode sehr viel leichter zu bewerkstelligen. Die entfernten Ablagerungen mussten nur noch vom eingesetzten Reinigungswasser getrennt werden, was häufig in den betriebseigenen Kläranlagen erfolgen konnte. Die Entsorgung konnte auf das zu reinigende Produkt reduziert werden.

Besonders in humanitärer Sicht brachte die Hochdruckreinigung weitere Vorteile mit sich: Spezielle Düsen, sogenannte Tankwaschköpfe und Vorrichtungen zu deren Positionierung führten dazu, dass Personal für die Reinigung nicht mehr oder nur noch sehr selten in die Behälter einsteigen musste. Damit war das Ende des bergmännischen Abbaus, also der manuellen Reinigung unter schweren körperlichen Strapazen besiegelt.

Beide Komponenten, die Humanität wie auch die neuen Möglichkeiten der Hochdruckreinigung, stellten eine dem Zeitgeist folgende Entwicklung dar, welche besonders den steigenden Ansprüchen hinsichtlich Bedarf und Qualität entsprach.

Die steigenden Ansprüche an Umweltverträglichkeit, Produktqualität und an die Produktivität führten letztlich zur immer breiter werdenden Akzeptanz der Hochdruck-Technik bei der Behälterinnenreinigung.

Die Technologie der „hydrodynamischen Reinigung“ mittels Hochdruckwasser war etabliert und findet ihre Fortsetzung in den weiter steigenden Anforderungen hinsichtlich Druck, Posi-

tionierbarkeit, Reproduzierbarkeit und Beständigkeit.

So gesehen ist die Entwicklung der Innenreinigung von Behältern und Reaktoren mit Hochdruckwasser eine von der Öffentlichkeit weitgehend unbemerkte „Revolution“, die schon seit Beginn der Industrialisierung ihre Entwicklung nimmt.

Automatisierungsgrade

Mit der zunehmenden Steigerung des Automatisierungsgrades, unter anderem durch die damit einhergehenden häufigeren, gründlicheren und reproduzierbareren Reinigungsvorgänge, konnte eine Verbesserung der Prozess-Sicherheit erreicht werden. Dabei haben die verschiedenen Grade der Automatisierung auch im Vergleich ihre Existenzberechtigung. Neben der Erfüllung ihrer primären Aufgabe – nämlich durch saubere Behälter eine grundlegende Voraussetzung für hochwertige Produkte zu schaffen – ist bei der Auswahl des Automatisierungsgrades in erster Linie der Themenbereich um Produktivität und Wirtschaftlichkeit als Entscheidungsfaktor relevant.

Manuell

Da Tankwaschköpfe, kurz TWK, auch frei am Schlauch hängend eingesetzt werden können, ist dies der einfachste aller Lösungsansätze: Ein Domdeckel, durch den der Hochdruckschlauch geführt werden kann und entsprechende Vorrichtungen, die verhindern, dass der Schlauch mit dem Tankwaschkopf unkontrolliert in den Behälter rutschen kann, reichen aus, um eine einfache Positionierung der Düsenköpfe vorzunehmen.



Abbildung 2
Vorher/Nachher Vergleich eines einfachen, mit Hochdruckwasser gereinigten Behälters

Einbauten verhindern oftmals allein durch ihre Anordnung die Möglichkeit der einfachen Positionierung. Zudem führen sie während des Reinigungsvorgangs zu Schattenbildung. Dadurch wird häufig eine seitliche Verlagerung der senkrechten Achse für den Schlauch mit dem TWK erforderlich. Dies geschieht beispielsweise mit Hilfe von kardanisich bzw. kugelig gelagerten Rohren mit möglichst vielen Freiheitsgraden zur Positionierung und ebenso vielen Sicherungen zur Fixierung der Reinigungsposition. Die Positionierung an sich wird manuell vorgenommen und je nach Einsatzfall immer wieder angepasst und verändert. Die einfache Bedienbarkeit und die äußerst flexiblen Einsatzmöglichkeiten für verschiedenste Behälter und Einbaupositionen machen diese Vorrichtungen zu einer äußerst mobilen und dabei kostengünstigen Reinigungslösung.

So werden beispielsweise Schlauchpositioniereinrichtungen dann verwendet, wenn eine Positionierung der senkrechten Achse für den Tankwaschkopf einfach und direkt aus der Reinigungsöffnung angesteuert werden kann. Bedarf es hingegen einer freien Positionierung im Raum, ist eine Rohrpositionier- vorrichtung mit fest installiertem Tankwaschkopf von Vorteil.

Semiautomatisch

Bei semiautomatischen Einheiten wird die Positionier- vorrichtung ebenfalls manuell über der Reaktoröffnung positioniert und befestigt, der anschließende Reinigungsvorgang erfolgt jedoch vollautomatisch. Die Vorrichtungen sind deutlich komplexer und beinhalten neben den mechanischen Komponenten zusätzliche Sensorik und elektrische Anbindungsmöglichkeiten an das Prozessleitsystem. Semiautomatische Systeme finden beispielsweise Einsatz bei Behälterkolonnen, deren Behälter mehrfach in baugleicher Form in einer systematischen Anordnung (zum Beispiel in Reihe) angeordnet sind. In der Regel können dann für die Positionierung bauseits entsprechende Vorkehr-



ungen getroffen werden, so dass die Vorrichtungen manuell in die richtige Einsatzposition gebracht und die Behälter sukzessive durchgereinigt werden können.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist dies eine äußerst attraktive Lösung. Wenn die Reinigung der Behälter nicht zeitgleich, sondern nacheinander erfolgen kann, genügt eine einzige Vorrichtung, um die Behältnisse einer kompletten Produktionsanlage zu reinigen.

Für diese Einsatzbereiche sind besonders Haspelsysteme prädestiniert. Sie können beispielsweise über Deckenschienen oder mittels Rollen an die Einsatzposition gebracht werden. Hublängen bis 25 m sind durch Ab- und Aufwicklung des Hochdruckschlauches problemlos umsetzbar. Vor Ort in der Reinigungsposition bestätigt, kann der Reinigungsprozess freigegeben werden und automatisch ablaufen. Alle definierten vertikalen Positionen werden angefahren und entsprechend der vorprogrammierten Reinigungsrezepturen abgearbeitet. Im Ergebnis können auf diese Weise die Produktionsanlagen reproduzierbar sauber gehalten werden. Auch auf Veränderungen im Produktionsprozess durch beispielsweise geänderte Reinigungsanforderungen, kann mittels Anpassung des Reinigungsprogramms reagiert werden.

Vollautomatisch

Für einen vollautomatischen Reinigungsablauf ist es notwendig, die gesamte Reinigungsvorrichtung fest und dauerhaft zu installieren. Auf diese Weise ist

die Reinigung als Teil des Produktionsablaufs komplett integriert. Die Reinigungszyklen sind im Produktionsablauf berücksichtigt, so dass ein selbstständiger Reinigungsablauf zu vorgegebenen Zeiten oder nach Prozessfortschritt stattfinden kann.

Neben der unverzichtbaren dauerhaften Installation kann bei diesen Systemen sehr flexibel auf die produktionstechnischen Erfordernisse eingegangen werden. Für unter Druck stehende Produktionseinheiten kann das System auch gas- und druckdicht ausgeführt werden. Dies ermöglicht es, den Reinigungsvorgang unmittelbar zwischen zwei Produktionszyklen zu legen, ohne dass der Reaktionsbehälter zuvor evakuiert werden muss.

Als vollautomatische Reinigungssysteme sind hier besonders gasdichte Lanzen prädestiniert. Auf Grund ihrer Konzeption werden diese ausschließlich am Lanzenrohr gegen austretende Gase während des Reinigungsvorgangs abgedichtet. Wegen der örtlichen Gegebenheiten ist es oft nicht möglich, einfache Lanzen einzusetzen, deren Höhe durchaus mehrere Stockwerke überragen können. Daher werden häufig auch Systeme mit mehreren Funktionalitäten kombiniert. Beispielsweise können Haspeln druckdicht ausgeführt werden. Auch die Kombination von Haspeln mit abknickbaren Knie- systemen schaffen ein breites, individuelles Lösungsspektrum.

Sicherlich sind vollautomatische Systeme, unter anderem auf Grund ihrer Komplexität, aber besonders auf Grund der unmittelbaren 1:1 Zuordnung zu den zu reinigenden Behältern ein nicht zu vernachlässigender Kostenfaktor im Rahmen der gesamten Anlagekosten. Die Produktivitätsvorteile und die damit möglichen Qualitäts- und Reinheitsvorteile am Produkt relativieren diese Investitionen jedoch erheblich. Die Reduzierung der Reinigungsintervalle durch regelmäßige, prozessintegrierte Reinigungsvorgänge bewirken neben einer höheren Ausbringung mit hoher

Abbildung 3
Kombiniertes gasdichtes Haspel-Kniesystem zur vollautomatischen Reinigung

Produktqualität auch eine höhere Flexibilität der erzeugten Produkte. Werden noch Sicherheitsaspekte hinsichtlich möglicher Freisetzung toxischer Substanzen oder Explosionsgefährdung mit einbezogen, stellen automatische, prozessintegrierte Reinigungssysteme äußerst sinnvolle, rentable und wirtschaftliche Investitionen dar.

Anforderungen an ein modernes Reinigungssystem

Die zunehmende Komplexität der Behältnisse und der steigende Bedarf an Innenreinigung brachten neue Herausforderungen mit sich:

Die Behälter wurden vielseitiger und komplexer, beispielsweise durch vielfältige Einbauten wie Heiz- oder Kühlsysteme, Rührwerke, Strömungsstörern etc. oder auch durch unterschiedlichste Behältergeometrien.

Unter der Zielsetzung einer effektiven Hochdruckreinigung ist es nicht damit getan, dass Tankreinigungsgeräte nur mit Wasser „spritzen“; die Ansprüche liegen deutlich über dem reinen „Auswaschen“ und sind mit einer einfachen Reinigung nicht abgedeckt. Die Herausforderung liegt darin, dass mit einem geeigneten Verhältnis von Druck und Fördermenge gereinigt wird und dabei der Wasserstrahl sicher, gezielt, geführt und definiert, mit einem hohen Wirkungsgrad seine Funktion erfüllt.

In Abhängigkeit der individuellen Reinigungsaufgabe können die einzelnen Reinigungsparameter variiert werden. Im Einzelnen gehören dazu:

- Der erforderliche Wasserdruck (Betriebsdruck)
- Die notwendige Wassermenge (Förderstrom)
- Die zu überbrückende Entfernung von der Düse bis zur Behälterwand (ggf. verbunden mit Positionswechsel)
- Die Vorschubgeschwindigkeit des Wasserstrahls (Rotordrehzahl)

Neben diesen primären Parametern werden an die Tankreinigungswerkzeuge, sogenannte Tankwaschköpfe, weitere Anforderungen – auch in wirtschaftlicher Hinsicht – gestellt. Im Folgenden sollen die wesentlichen Kriterien für industriell eingesetzte Tankwaschköpfe erläutert werden.

Tankwaschköpfe sind das elementare Bauteil der gesamten Reinigungsanlage. Daher werden speziell an diese Komponenten besonders hohe Ansprüche hinsichtlich der Verfügbarkeit gestellt: Tankwaschköpfe müssen so konstruiert sein, dass ein Ausfall außerhalb der Wartungsintervalle vermieden wird. Alle mechanischen Bauteile sind für entsprechend hohe Standzeiten ausgelegt und erfüllen damit die Voraussetzungen für einen störungsfreien Betrieb.



Abbildung 4
Tankwaschkopf mit Kompaktrotor und Zentrierspitze für 1600 bar

Der Arbeitsweise der Tankwaschköpfe liegt ein dreidimensionales Strahlbild zu Grunde: Das zugeführte Hochdruckwasser fließt durch den TWK und tritt an den sich am Rotor befindenden, exzentrisch angeordneten Düsen wieder aus. Durch actio-reactio wirkt eine Rückstoßkraft, welche in Kombination mit der außermittigen Anordnung der Düsen ein Drehmoment erzeugt, und dadurch den Rotor zur Rotation um die eigene Achse bringt. Über ein internes Getriebe wird mit der Rotordrehung auch eine Rotation des gesamten Tankwaschkopfes um seine Längsachse erzeugt. Die sich auf diese Weise überlagernden Bewegungsabläufe ergeben ein dreidimensionales Reinigungsbild und ermöglichen damit eine Abdeckung der gesamten inneren Oberfläche.

Auch die Werkstoffbeständigkeit der Tankwaschköpfe gegenüber der Umgebung, in der sie eingesetzt werden, also gegenüber unzähligen zu reinigenden Produkten, ist hierbei ebenso von Relevanz wie die Temperaturbeständigkeit. Beide Eigenschaften sind deshalb wichtig, weil die Werkzeuge häufig in aggressiven Atmosphären, teilweise unter hohen Temperaturen eingesetzt werden. Speziell unter diesen Bedingungen ist es wichtig, dass weder Gase in den Tankwaschkopf eindringen noch Schmierstoffe austreten können. Gegebenenfalls sind hierfür auch weitergehende Maßnahmen notwendig.

Abbildung 5
Übersicht Einsatzgrenzen

Einsatz von Tankwaschköpfen im Ex- und Nicht-Ex-Bereich URACA 5

Reinigungsmedium:	nicht brennbar z.B. Wasser		brennbar z.B. Lösemittel	
Atmosphäre vor der Reinigung im Behälter:	nicht explosiv	Ex-Zonen 0, 1 oder 2	nicht explosiv	Ex-Zonen 0, 1 oder 2
Betriebsdruck	unbegrenzt	max. 500 bar	unbegrenzt	max. 50 bar
Durchfluss	unbegrenzt	max. 300 l/min	unbegrenzt	max. 60 l/min
Behälter-Ø	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	max. 3 m
Behältervolumen	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	100 m³
Umgebungstemperatur	5 bis 95 °C	unbegrenzt	5 bis 95 °C	5 bis 70 °C
Medientemperatur	5 bis 95 °C	unbegrenzt	5 bis 95 °C	5 bis 70 °C
Fremdstoffanteil	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	max. 1 %
Erdungerforderlich	nein	nein	ja	ja
ATEX-betroffen	nein	nein	ja	ja



Abbildung 6
Ebenflurmäßig eingebaute Behälter

Für eine gute Reinigungsleistung ist neben der Stahlführung, welche durch die mechanischen und konstruktiven Elemente bestimmt ist, auch das Strahlbild verantwortlich. Unter dem Strahlbild versteht man die Entwicklung der Bündelung des Wasserstrahls über die Entfernung bis zum Auftreffen an der Wirkungsstelle. Verantwortlich hierfür ist in erster Linie die Geometrie der Düse und der dem Strömungsverlauf vorgelagerten Innenteile. Speziell an diesem Punkt sind strömungsoptimierende Maßnahmen, beispielsweise durch die Vermeidung von Turbulenzen, von großer Bedeutung. Einerseits führt ein so gebündelter Wasserstrahl zu den gewünschten Reinigungsergebnissen, auch noch an relativ entfernten Stellen, die mehrere Meter entfernt sein können. Andererseits führt dies auch zu einem besseren Wirkungsgrad des gesamten Düsenkopfes. Hinsichtlich des gesamten Reinigungsvorgangs führen diese Maßnahmen zu einer Verbesserung der Reinigungsleistung sowohl in zeitlicher wie auch in qualitativer Hinsicht.

Doch nicht nur die Tankwaschköpfe selbst, sondern auch deren Positionierung im Behälter ist ein relevantes Kriterium für einen effektiven und zielführenden Reinigungsvorgang. Daher ist es das Gesamtsystem, dominiert von der Positioniervorrichtung, welches ebenfalls eine technische Entwicklung erfahren hat und technischen Anforderungen wie

auch wirtschaftlichen Kriterien standhalten muss.

Die Einflussfaktoren für die Kriterien an das Gesamtsystem sind neben den Prozessbedingungen, also den Behälterdrücken, der Behälteratmosphäre, den Behältertemperaturen usw. auch die Positionierbarkeit des Tankwaschkopfes. Je nach Behältergeometrie ist es erforderlich, die Düse so zu platzieren, dass der Wasserstrahl sein Ziel erreichen kann. Einbauten zum Beispiel verlangen eine zweite oder teilweise noch weitere Positionen der Düse, um Schattenbildung zu verhindern und so die gesamten zu reinigenden Oberflächen im Behälter mit dem Wasserstrahl zu erreichen. Auch die Abmessungen der Behälter oder die Position der Öffnungen für die Zugänglichkeit sind für die Auslegung der Reinigungssysteme relevant. Nicht immer ist es möglich, den Tankwaschkopf einfach frei am Hochdruckschlauch hängend in einem Behälter zu positionieren. In diesen Fällen stehen eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verfügung, den Tankwaschkopf auch außerhalb der Senkrechten unterhalb der Behälteröffnung zu platzieren. Die Kombination von Haspeln (für die senkrechte Bewegung) und Lanzen ermöglicht es, die Reinigungsdüse sowohl in der Horizontalen als auch in der Senkrechten in eine für die Reinigung geeignete Position zu bringen.

Einsatz in explosionsgefährdeter Atmosphäre

Im Vordergrund steht immer die maximale Sicherheit für Personal und Material. Dies gilt auch und ganz besonders bei Einsatzfällen in explosionsgefährdeten Produktionsbereichen.

Tankwaschköpfe, die im europäischen Raum in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden, unterliegen den europäischen Explosionsschutzrichtlinien 2014/34/EU und 1999/92/EG, die besser als ATEX-Richtlinien bekannt sind (Europäische Union, 2021).

Hierbei ist zu unterscheiden: Die Richtlinie 2014/34/EU gilt für Hersteller (Produktlinie). Sie gibt die Schutzziele vor, die vom Hersteller bei der Konstruktion und Fertigung zu erfüllen sind. Die Richtlinie 1999/92/EG hingegen gilt für die Betreiber und regelt die Belange, welche im Betrieb zu beachten sind. Sie wird deshalb auch als Betreiberlinie bezeichnet.

Damit Tankwaschköpfe für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen der Zone 0 (ständiges Vorhandensein von explosivem Gemisch aus Sauerstoff und Gasen, Nebeln oder Dämpfen) und Zone 20 (ständiges Vorhandensein von explosivem Gemisch aus Sauerstoff und Stäuben) geeignet sind, müssen sie die ATEX-Gerätekategorie 1G (geeignet für den Einsatz in Zone 0) bzw. 1D (geeignet für den Einsatz in Zone 20) erfüllen und ein sehr hohes Maß an konstruktiver Sicherheit aufweisen. D.h. zu keinem Zeitpunkt dürfen potentielle Zündquellen wirksam werden, die zu einer Zündung der explosionsgefährdeten Atmosphäre im Behälterinneren führen können.

Hierfür sind konstruktive Maßnahmen notwendig, die sicherstellen, dass zu keinem Zeitpunkt Zündquellen im Sinne der DIN EN 1127-1 wirksam werden. Neben den entsprechenden konstruktiven Maßnahmen sind auch formale Anforderungen zu erfüllen. Hierzu gehören zum Beispiel das

Vorhandensein einer Baumusterprüfung nach Anhang III und die Zertifizierung des QS-Systems nach Anhang IV der ATEX-Richtlinie 2014/34/EU durch eine notifizierte Stelle. Alternativ kann auch eine Einzelabnahme gemäß Anhang IX erfolgen.

Neben den klassischen Zündgefahren, hervorgerufen z.B. durch unzulässig hohe Erwärmung oder durch Reib- und Schlagfunken, müssen beim Verdüsen von Flüssigkeiten auch Zündgefahren infolge von elektrostatischen Aufladungen beachtet werden. Hierzu finden sich mittlerweile einschlägige nationale und internationale Normen. Diese Regelwerke begrenzen die Prozessparameter (u. a. Druck und Durchflussmenge) auf ein Maß von dem sicher ausgegangen werden kann, dass es zu keiner Gefährdung kommt (siehe Abbildung 8: Übersicht Einsatzgrenzen). Im Rahmen der internationalen Normen sind hier insbesondere die Vorgaben der IEC TS 60079-32-1 und des CENELEC Reports R044-001 zu nennen.

Die nachfolgende Übersicht fasst die Einsatzgrenzen in Abhängigkeit der verschiedenen Ausgangssituationen zusammen. Sie zeigt die Begrenzung von Prozessparametern auf, welche unter anderem aus den Vorgaben von IEC/CELENEC zur Vermeidung von Zündgefahren aufgrund elektrostatischer Aufladungen resultieren.

Integration in den Gesamtprozess

Wie bereits im Rahmen der Anforderungen erwähnt, nehmen auch die Eigenschaften der in den Behältern produzierten Produkte wie auch die Prozessbedingungen Einfluss auf die Auslegung der Reinigungsanlagen. Aufgrund dieser Aspekte sowie des Explosionsschutzes und der Sicherheit gewinnen besonders auch die Kriterien Temperaturbeständigkeit und Dichtigkeit im gesamten System an Bedeutung: Druckdichte Systeme bis PN20 gewähren nicht nur Sicherheit von austretenden giftigen und/

oder explosiven Gasen. Die Möglichkeit, den Reinigungsprozess unter nichtatmosphärischen Bedingungen durchführen zu können, erhöht zusätzlich noch die Produktivität der gesamten Anlage. Als Beispiel seien hier PVC-Reaktoren genannt, also Reaktoren, in denen Kunststoffe wie zum Beispiel Polyvinylchlorid hergestellt werden. Technisch wird zwischen gas- und druckdichten Systemen unterschieden: Die Eigenschaft der Gasdichtheit bezeichnet ein Abdichten gegen das Austreten von Gasen während des Reinigungsvorgangs. Unter der Eigenschaft der Druckdichtigkeit ist dagegen zu verstehen, dass die Reinigungsvorrichtung dem Betriebsdruck über den gesamten Produktionszyklus standhält. Bei Arbeiten unter Betriebsüberdruck wird durch diese Eigenschaften nicht nur ein mögliches Ausströmen giftiger Gase verhindert, sondern auch noch eine enorme Zeitersparnis realisiert, indem zum Beispiel auf eine Evakuierung des Reaktors vor der Reinigung verzichtet werden kann. Reinigungsanlagen, welche auf die individuellen Be-

triebsbedingungen spezialisiert und abgestimmt sind, bewirken neben verbesserten Sicherheitsbedingungen auch eine deutliche Erhöhung der Produktivität, beispielsweise in Folge kürzerer Produktion-Ausfallzeiten. Gleiches gilt für die Korrosions- und die Temperaturbeständigkeit von Werkzeug und System: Die Berücksichtigung thermischer Expansion, sowohl des Behälters als auch des Reinigungssystems ist mit einer der wesentlichen Voraussetzungen für eine prozessintegrierte Reinigung.

Letztendlich ist eine vollumfängliche Betrachtung des Reinigungsprozesses bis hin zur Schnittstelle der Steuerung erforderlich für einen sicheren, integrierten Betrieb der Anlage. Die Auswirkungen dieser Betrachtungsweise hat selbst noch Konsequenzen für den Bau und die Gestaltung der Behälter an sich: Früher fand die Zugänglichkeit für Reinigung wenig Berücksichtigung, ebenso wenig wie eine Anpassung der Behälter an die Reinigungsausrüstung oder gar an die vorhandenen technischen wie baulichen



Abbildung 7
Geschossübergreifende Lanzensysteme

Gegebenheiten. Mittlerweile ist eine steigende Relevanz der Reinigung an sich wahrzunehmen. Dies führt zu einer Zunahme der gesamtheitlichen Betrachtung und zur Berücksichtigung der Anforderungen von Reinigungssystemen durch gezielte konstruktive Maßnahmen beim Behälterbau ebenso wie bei der architektonischen Auslegung der Gebäude, zum Beispiel bei der Anordnung der Etagen und der Begehbarkeit.

Fazit

Die industrielle Hochdruckreinigung ist mit ihren Produkten ein in der Öffentlichkeit kaum wahrgenommener Industriezweig. Aus einfachsten Anfängen hat sich weitgehend unbemerkt und im Schatten vieler High-Tech-Entwicklungen eine Technik etabliert, die uralte Anwendungen mit Mitteln moderner Technik verbindet: Die hydrodynamische Reinigung mit Hochdruckwasserstrahlen.

Diese Technologie ist das Ergebnis einer langjährigen Entwicklung und bildet in vielen Produktionsprozessen die Basis für nachhaltige Verbesserungen hinsichtlich der humanitären und ökologischen Bedingungen, der Produktqualität, der Produktionssicherheit und der Produktivität:

Die wesentliche humanitäre Errungenschaft der Hochdruckreinigung mit Tankwaschköpfen ist die Tatsache, dass Menschen aus der Gefahrenzone herausgenommen werden konnten und vom Reinigungspersonal zu Bedienern der Reinigungsanlagen avancierten. Der ökologische Aspekt basiert neben energetischen Vorteilen in erster Linie auf dem Einsatz von kaltem Wasser für die Reinigung, ohne Zusatz von weiteren Stoffen. In besonders günstigen Fällen kann das zur Reinigung verwendete Medium auch wieder dem Produktionskreislauf zugeführt werden, so dass keine zu entsorgenden Produkte zurückbleiben. Die rechtzeitige und regelmäßige Reinigung bewirkt auch eine Verbesserung der Qualität der produzierten Produkte vor allem hinsichtlich deren Reinheit. Insgesamt führt die Technologie, wesentlich getrieben durch fortlaufende Automatisierung, zu einer deutlichen Steigerung der Produktivität. Kürzere Produktions-Stillstände durch prozessintegrierte Reinigungsanlagen führen neben allen anderen Vorteilen besonders zu einer höheren Wirtschaftlichkeit der gesamten Produktionsanlage.



**Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH)
Werner Stiefel**

Werner Stiefel hat nach einer kaufmännischen Ausbildung Wirtschaftsingenieurwesen an der Fachhochschule für Technik in Esslingen studiert und ist seit 1986 bei URACA als Marketing- und Werbeleiter tätig.
Kontakt: w.stiefel@uraca.de



Dipl.-Ing. (FH) Michael Ruoff

Michael Ruoff hat an der Fachhochschule Reutlingen Maschinenbau studiert und ist seit 1994 bei URACA im Bereich Forschung und Entwicklung tätig. Zusätzlich verantwortet er die Ausbildung im technischen Bereich.
Kontakt: m.ruoff@uraca.de

Impressum

AWTmagazin

Magazin des Arbeitskreises Wasserstrahltechnologie

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier

Redaktion: Markus Mlinaric, Rico Riefenstahl

Titelbild: Institut für Werkstoffkunde (IW)

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.
Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS-Technik und Wissen GmbH, 2021
An der Universität 2, 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434, Fax: 0511-762-18037
www.tewiss-verlag.de, mail: info@tewiss-verlag.de

ISBN 978-3-95900-590-6
<https://doi.org/10.15488/11464>

Herstellung: Druckteam GmbH, Hannover

Printed in Germany

Leibniz Universität Hannover
Institut für Werkstoffkunde

Unterwassertechnikum Hannover
Wasserstrahllabor Hannover
Lise-Meitner-Straße 1
30823 Garbsen

Kontakt:
wlh@iw.uni-hannover.de
+49 (0) 511 762 9824

Das Institut für Werkstoffkunde

Im richtigen Leben und für jedes funktionierende Wirtschaftssystem sind moderne Werkstoffe und die entsprechenden Fertigungstechniken unabdingbare Voraussetzung. Moderne Werkstoffe zu beherrschen ist heute für viele Unternehmen der Produktionstechnik die Bedingung, um auf dem globalen Markt zu bestehen. Eine echte Herausforderung, denn die Vielfalt der Werkstoffe und die Geschwindigkeit ihrer Weiterentwicklung haben in den letzten Jahren drastisch zugenommen.

Am Institut für Werkstoffkunde bearbeiten interdisziplinäre Teams diese Herausforderung sowohl in Projekten der Grundlagenforschung als auch in anwendungsorientierten Projekten, häufig in Kooperation mit nationalen und internationalen Partnern aus der Industrie, aus Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen.

Neben der Forschung bildet die fundierte Ausbildung von Studierenden und Doktoranden den zweiten Schwerpunkt des Instituts für Werkstoffkunde.



*Leiter des Instituts für Werkstoffkunde:
Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier*

Das Institut für Werkstoffkunde ist in fünf wissenschaftliche Bereiche sowie übergeordnete Einrichtungen organisiert:

Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier

Oberingenieur: Dr.-Ing. Florian Nürnberger



Biomedizintechnik und Leichtbau

Dr.-Ing. Christian Klose

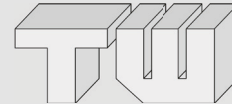
- Druck-, Kokillen- und Sandguss
- Strangpressen und Walzen
- Metallische Implantatwerkstoffe
- Magnesium- und Aluminiummetallurgie



Füge- und Oberflächentechnik

Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Kai Möhwald

- Löten & Thermische Prozesstechnik
- Thermisches Spritzen und PVC
- Beschichtungsservice (Thermisches Spritzen)



Technologie der Werkstoffe

Dr.-Ing. Sebastian Herbst

- Stahlmetallurgie
- Wärmebehandlung und Simulation
- Mikrostrukturcharakterisierung
- Materialermüdung
- Funktionswerkstoffe



Unterwassertechnik Hannover

Dr.-Ing. Thomas Hassel

- Elektronenstrahltechnik
- Schweißtechnik
- Schneidtechnik
- Wasserstrahltechnik
- Korrosionsprüfung



Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Dr.-Ing. David Zaremba

- Elektromagnetische Prüfverfahren
- Radio- und Thermographie
- Ultraschalltechnik
- Prozessregelung
- Körperschall- und Schallemission

Übergeordnete Einrichtungen

- **Analysentechnik und Schadensforschung**
Dr.-Ing. Torsten Heidenblut
- **Materialprüfung**
Dr.-Ing. Mark A. Swider
- **Mechanische Werkstatt und Lehrwerkstatt**
Dr.-Ing. Thomas Hassel
- **PZH-Metallographie**
Dr.-Ing. Mark A. Swider