Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstahl als universelles Schneidmittel

Internationale FSK – Fachtagung Schaumkunststoffe 2018

28./29. November 2018

Holger Werth
Uhde High Pressure Technologies Gmbh

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Die Kraft des Wassers

Grand Canyon

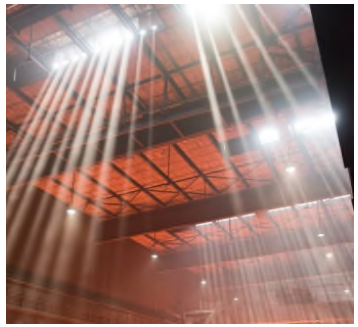
- Wasser ist Lebenselixier
- 71% der Erdoberfläche ist von H_2O bedeckt
- Seit Jahrmillionen schafft Wasser durch Erosion neue Formen
- Durch Erhöhung des Drucks verkürzen wir lediglich die Zeit, um neue Geometrien zu schaffen
- Präzises, flexibles Trennen mit hoher Produktivität

thyssenkrupp – Business Areas

Key indicators – fiscal year 2016/2017 [€ mn]

thyssenkrupp AG Sales: 42,971 | EBIT adj.: 1,910 | Employees: 158,739

	Components Technology	Elevator Technology	Industrial Solutions	Materials Services	Steel Europe	Steel Americas[4]
Sales[1]	7,571	7,674	5,522	13,665	8,915	1,848
Employees[3]	32,904	52,660	21,777	19,861	27,646	0



Electrolysis & Polymers Technologies

Uhde High Pressure Technologies GmbH

Founded 1930

Uhde High Pressure Technologies as part of thyssenkrupp
Key figures

Uhde HPT

Expert in providing industrial solutions

application of high pressures **300** to **14,000** bar

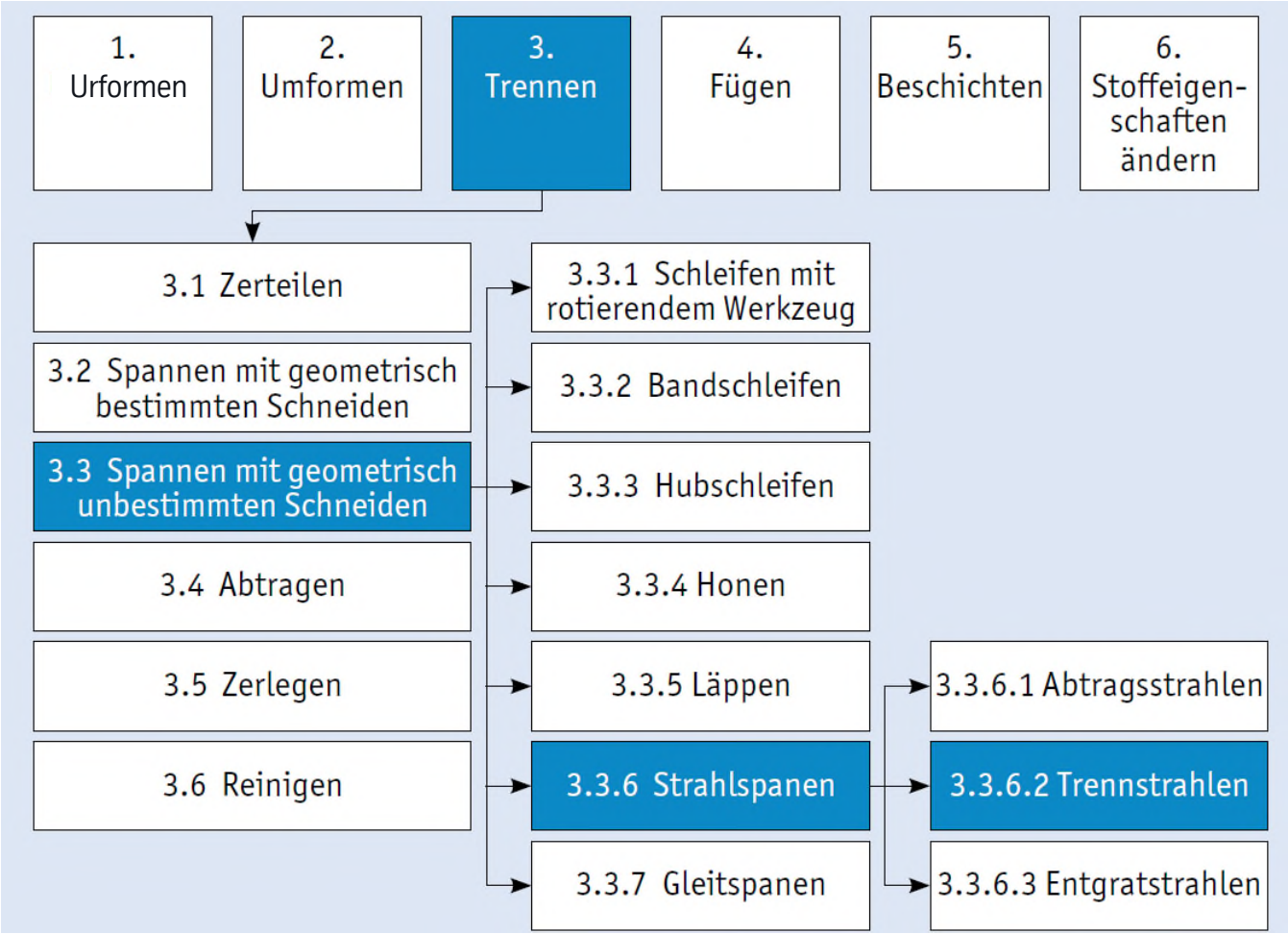
45
Sales [€ mn]

230
Employees

- LDPE
- Food / Pharma / SCF Process.
- Urea
- HPP
- Waterjet Cutting

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Einordnung des Schneidverfahrens nach DIN 8580



Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Medium Wasser

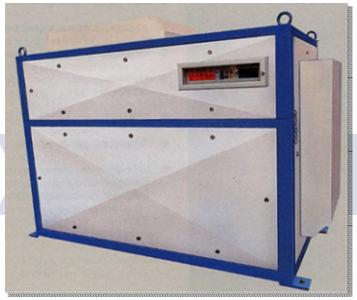
Wasserparameter	Einheit	Wert
Druck	bar (g)	4–7
Elektrische Leitfähigkeit	µS cm^{-1}	100 – 450
pH-Wert		7,0 – 8,5
Gesamthärte	°dH	2,0 – 10,0
Karbonathärte (Säurekapazität pH 4,3)	°dH	2,0 – 10,0
Basekapazität pH 8,2	mmol/l	0,00 – 0,25
Chlorid	mg/l	≤ 50
Eisen	mg/l	≤ 0,2
Mangan	mg/l	≤ 0,05
Kupfer	mg/l	≤ 2,0
Silikat	mg/l	≤ 5,0
(Filtrat-)Trockenrückstand	mg/l	≤ 350
Temperatur	°C	5 – 25

- Wasser ist bei 6.000 bar ca. 14 % komprimierbar
- Waterjet Medium:
  Wasser gemäß der deutschen Trinkwasserverordnung mit den in der Tabelle genannten Einschränkungen
- Lebensdauer wesentlicher Bauteile stark abhängig von:
  - Gleichgewicht des Wasser (Stabilitätsindex): ph-Wert, Gesamthärte, Karbonathärte
  - Silikat-Anteil
- Ggfs. Wasseraufbereitung vorsehen
  - Enthärtung
  - Wasser-Qualitätsmittel „EKOWA“

Der Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Geschichtliche Entwicklung

Uhde's erstes WJ system



3rd Generation

5th Generation

6th Generation

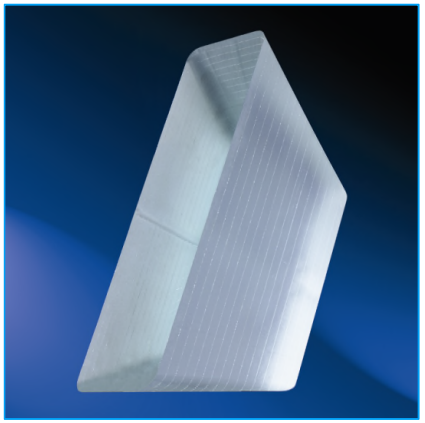
7th Generation

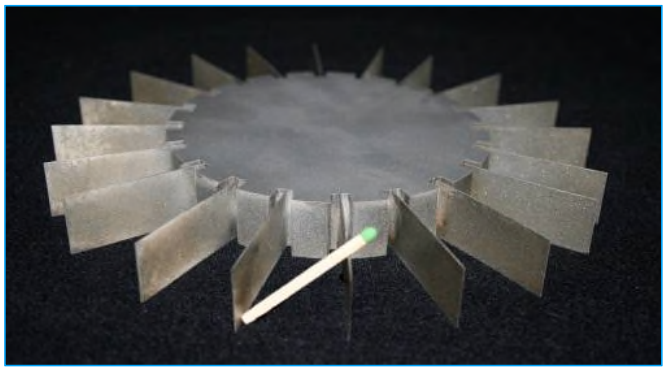
1970	1975/78	1980	1984	1990	1997	2000	2008	2018
30,000 psi 2,100 bar	50,000 psi 3,500 bar	55,000 psi 3,800 bar		60,000 psi 4,138 bar		87,000 psi 6,000 bar		Digitalisierung

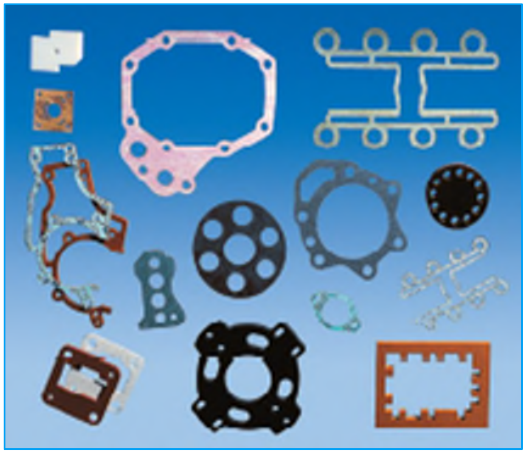
1968	1970	1983	1990	1998
Patent Dr. Norman Franz (700 bar)	Industr. Einsatz Reinwasserstrahl	Wasserabrasivstrahl; Entgraten Driver: Automotive & Aerospace	Suspensionsstrahl	Brachenspezifische Systeme

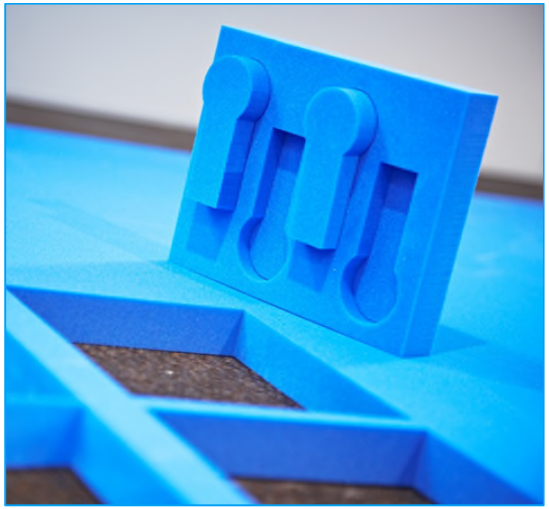
Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Eigenschaften / Vorteile des Schneidverfahrens







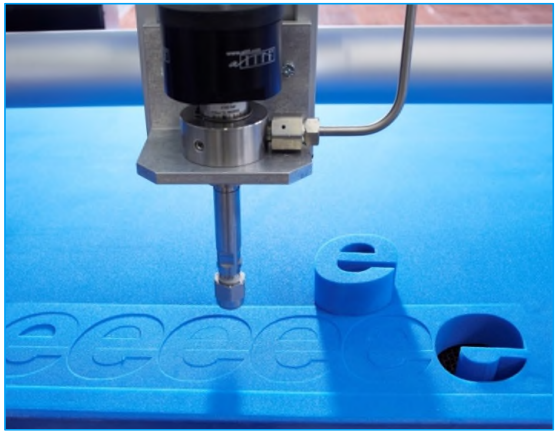


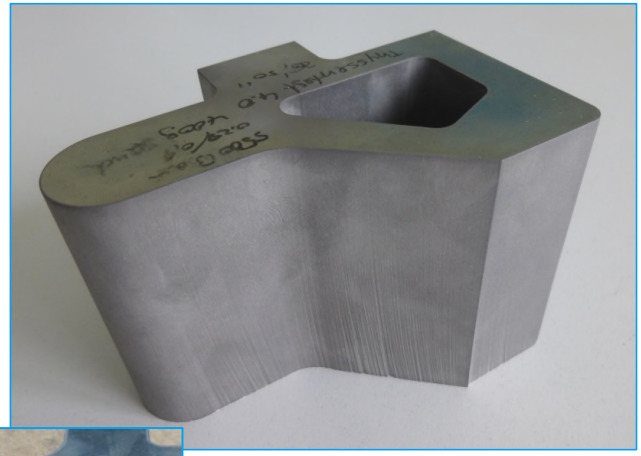
Quelle: Expert Systemtechnik / WARICUT

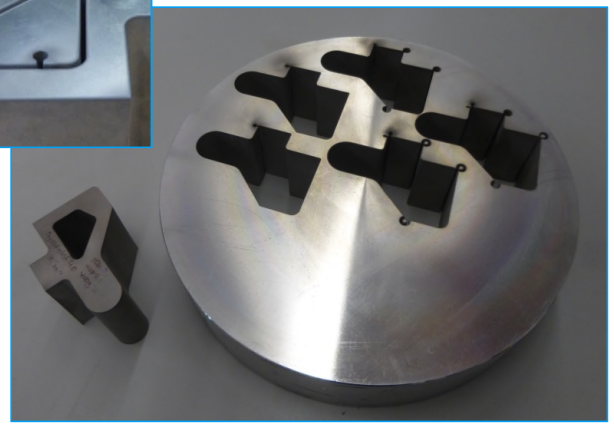
- Bearbeitung fast aller Werkstoffe:
  - hochfeste und spröde Werkstoffe
  - Verbundwerkstoffe
  - Glas, Steine, NE-Metalle, Lebensmittel, Papier, etc.
  - Schaumkunststoffe sind besonders gut und wirtschaftlich zu bearbeiten (ab 1.500 bar)
  - Achtung: je loser die Faser, desto schwieriger das Schneiden (Watte!)
- Keine Gesundheitsgefährdung:
  - keine Staubentwicklung
  - keine giftigen Gase und Dämpfe
- Keine chemische Beeinflussung
- Kaltschneideprozess: keine thermischen Spannungen und Gefügeveränderungen
- Minimaler Anpressdruck / kaum Reaktionskräfte:
  - keine mechanische Belastungen
  - keine induzierten Spannungen oder Mikrorisse

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Das Medium Wasser







- Teilegenauigkeiten von bis zu +/- 0,05 mm
- hohe Schneidkantenqualität
- Oberflächengüte bis Ra 3,2
- Innen- und außen liegende Geometrien
- Mehrlagen-Zuschnitte
- hohe Materialausnutzung
  - Minimaler Schnittspalt
  - Piercing (Anbohren)
  - Nesting / optimale Verschachtelung von Teilen
  - Verschnitt von Rohteilgeometrien kann noch genutzt werden
- Herstellung von Rohlingen für die nachgeschaltete, spanende Bearbeitung nahe an der Endkontur

Quelle: Expert Systemtechnik / WARICUT / L&D Jet Techniek

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Schneidverfahren im Vergleich

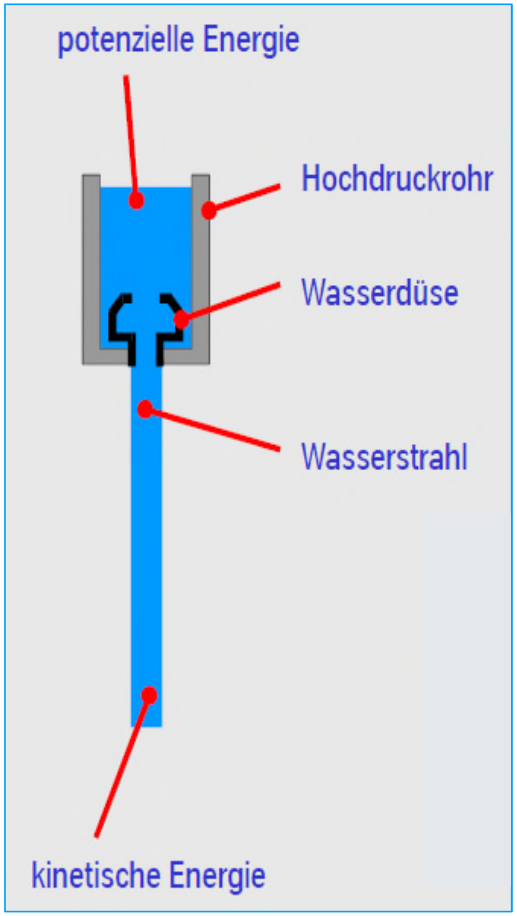
	Abrasiv-Wasserstrahl	Laserstrahl	Plasma	Brennschneiden
Materialdicke	++	O	+	++
Schnittqualität	++	++	O	O
Schnittgeschwindigkeit	+	++	+	+
Universeller Einsatz	++	-	+	O
Präzisionsschnitte	++	++	+	-
Nacharbeit	++	+	+	O
Schlackenbildung	+	O	O	+
Flexibilität	++	+	O	-
Gesamtbearbeitungszeit	+	+	-	O

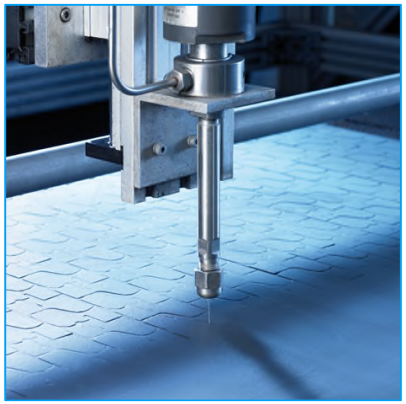
Der Wasserstrahl ist die flexibelste Werkzeugmaschine

++ = sehr gut + = gut O = befriedigend - = ausreichend

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Wasserstrahlschneiden mit Reinwasser





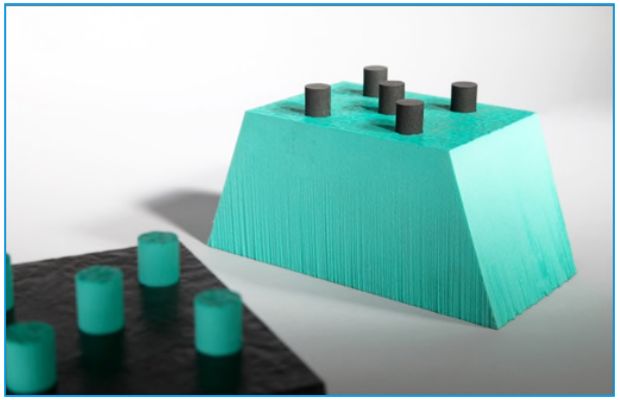
$$v_w = \varphi_d \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}}$$

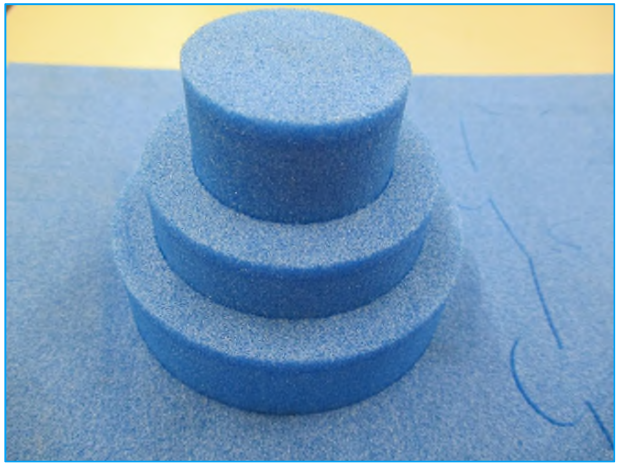
φ_d - energy transfer factor (typically 0,9 - 0,98)
ρ_w - density of water,
p - water pressure.

- Wasser steht unter hohem Druck (max. 6.000 bar)
- Potentielle Energie → Kinetische Energie
- Strahlgeschwindigkeit: bis zu 1.095 m/s (> 3-fache Schallgeschwindigkeit)
- Nicht der Druck, sondern die Impulskraft der Wassertropfen (kinetische Energie) trennt den Werkstoffverbund
- Strömungslehre: Bernoulli-Gleichung
- Hydraulische Leistung = Schneidleistung
- <u>Beispiel</u>
  - Druck: 4.000 bar
  - Düse: 0,28 mm
  - Volumenstrom: 2,17 l/min
  - Strahl-v: 840 m/s
  - Leistung: 14.5 kW

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Wasserstrahlschneiden mit Reinwasser





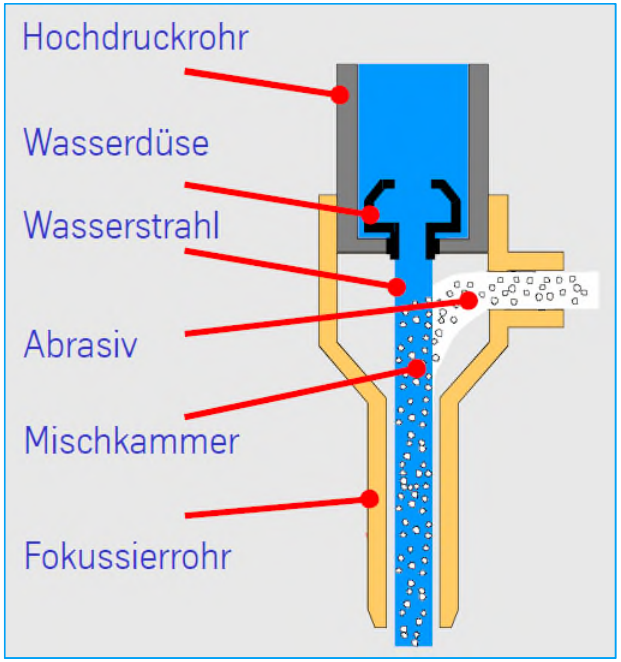
Quelle: Expert Systemtechnik / Marbach

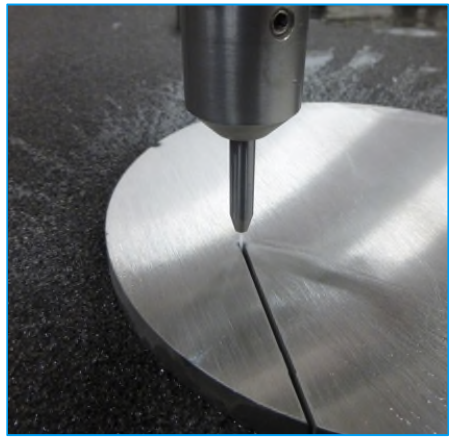
- Schneidspalt von 0,08 bis 0,25 mm
- Komplexe Geometrien
- Hohe Präzision
- Bis zu 200 m/min

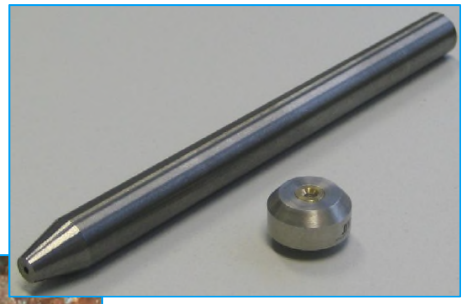
Rein-Wasserstrahlschneiden (4.000 bar)	
Material	**Materialstärke [mm]**
Gummi	80
Textilien	30
Leder	30
Holz	35
Laminat	35
Schaumstoff	50
Papier / Pappe	60

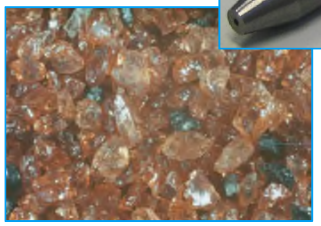
Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Wasserabrasiv-Injektor-Strahlschneiden (WAIS)





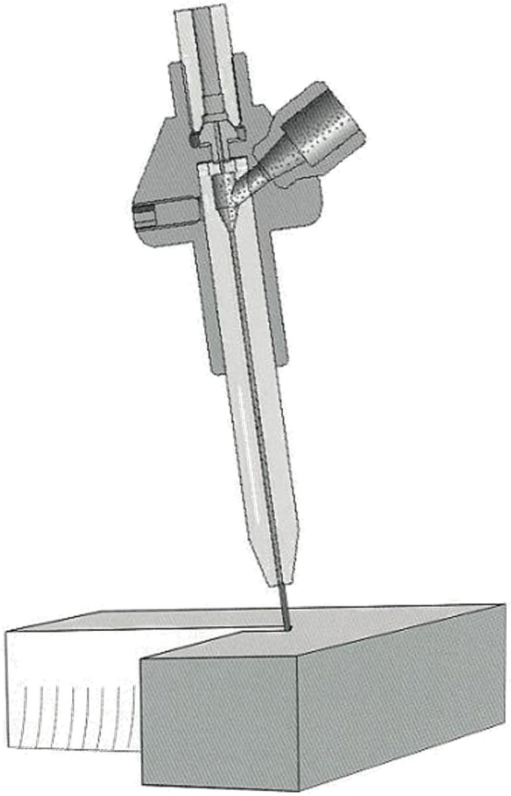




- Schneidstrahl besteht aus:
  - 4% Wasser
  - 1 % Abrasivmittel
  - Rest des Strahls ist Luft
- Wasser dient lediglich zur Beschleunigung der Abrasivpartikel (Energieübertragung)
- Abrasivpartikel bewirken den Abtrag (Mikrozerspanung)
- Injektion des Abrasivmittels durch Venturi-Effekt
- Strahl verliert mit zunehmender Tiefe durch die Strahl-/Material-Wechselwirkung und Partikelkollisionen stetig an Energie
- Abrasivmittel:
  - Granatsand
  - Olivin,
  - Korund
  - etc.

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Werkstückqualität - Kriterien und Einflussfaktoren

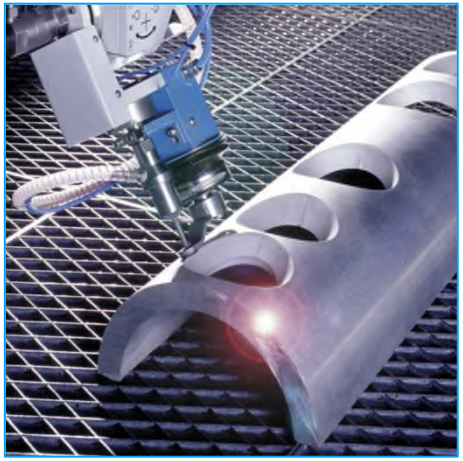


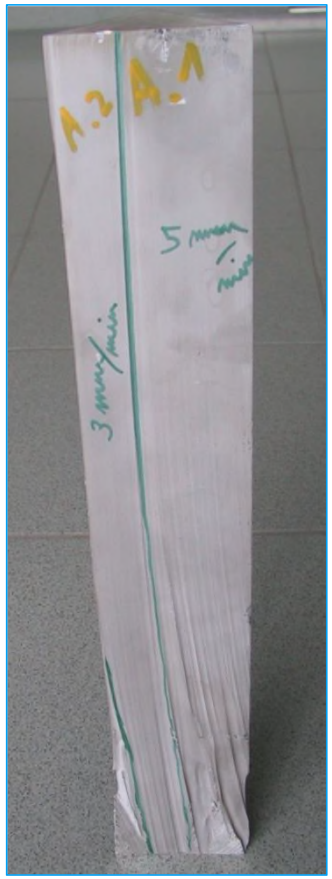
- Material / Werkstoff
  - Härte
  - Zähigkeit
  - Materialdicke
- Schneidparameter:
  - Betriebsdruck
  - Abrasivmittel (Art, Korngröße und Menge)
  - Düsendurchmesser und Kombination (1:3)
  - Düsenabstand
  - Vorschubgeschwindigkeit
  - Prozesssteuerung
  - Genauigkeit und Dynamik der Werkzeugmaschine

Quelle: Water Jet Sweden

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

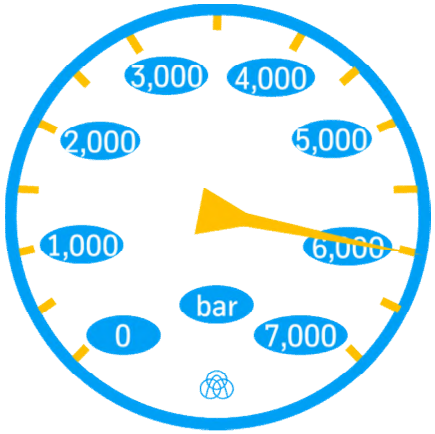
Die Kraft des Wassers





Abrasiv-Wasserstrahlschneiden	
Material	**Materialstärke [mm]**
Edelstahl	180
Stahl	180
Hastelloy	180
Hardox	180
Titan	250
Aluminium	300
Buntmetalle	180
Kunststoffe	180
Naturstein	180
Glas	160
Schaumstoff	300

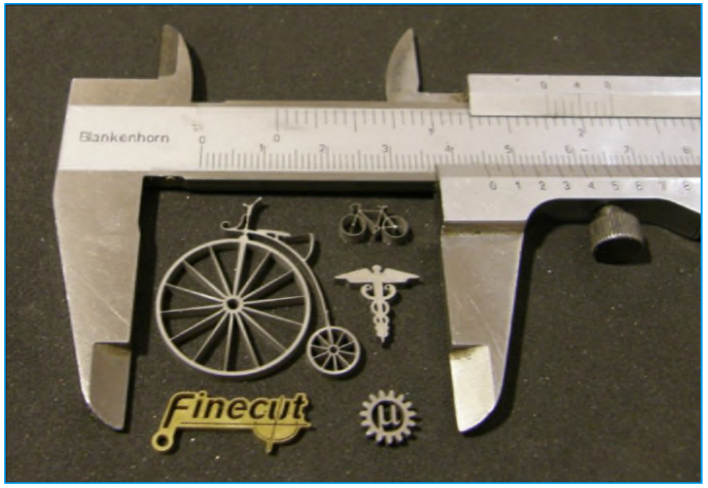
- Schneidspalt von 0,8 bis 1,3 mm
- Materialien bis zu 300 mm
- Höhere Produktivität durch 6.000 bar

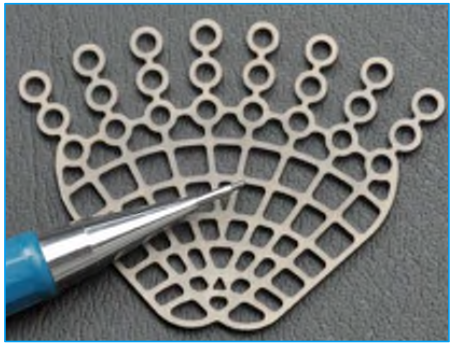


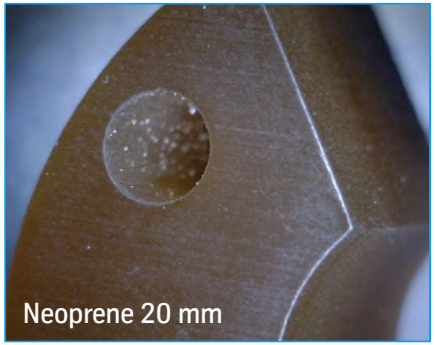
Quelle: WARICUT

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Mikrowasserstrahlschneiden / Micro-Waterjet





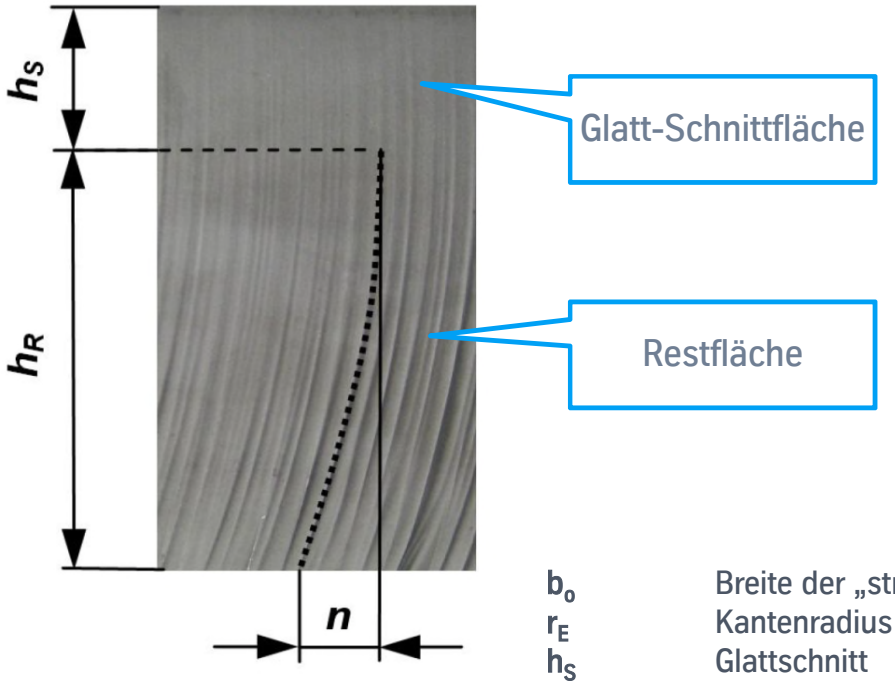


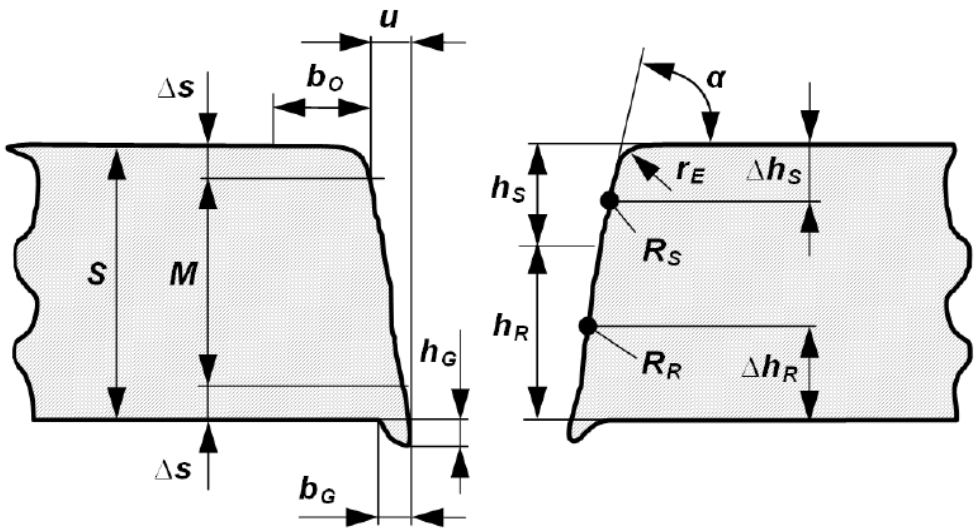
- Mikrowasserstrahlschneiden (Micro- Waterjet)
- Schneidegenauigkeit +/- 0,01 mm
- Positionsgenauigkeit +/- 0,005 mm
- Kleinster Bohrungsdurchmesser: 0,30 mm
- Materialdicke: ca. 0,01 bis 100 mm
- Schnittbreite:
  - 0,08 mm (Reinwasser)
  - 0,20 mm (Abrasivverfahren)

Quelle: Finepart (Finecut); micro-waterjet

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Kenngrößen an Schnittflächen beim AWIS gemäß VDI 2906 Blatt 10 (EN ISO 9013)

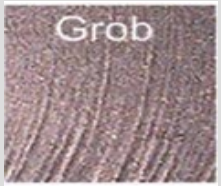




b_o	Breite der „strahlbeeinflussten Zone“	u	Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz
r_E	Kantenradius (Strahleintrittseite)	α	Flankenwinkel
h_S	Glattschnitt	s	Blechdicke
h_S/s	Glattschnittanteil		
R_S	Schnittflächenrauheit, gemessen als R_{zDIN}	Δs	0,1 s für $s < 2$ mm 0,2 mm für $s \geq 2$ mm
h_R	Restflächenhöhe	M	Messbereich zur Bestimmung von u und α
h_R/s	Restflächenanteil		
R_R	Restflächenrauheit, gemessen als R_{zDIN}	Diese Darstellung ist nicht maßstabsgerecht und gilt für Innen- und Außenkonturen	
b_G, h_G	Gratbreite, Grathöhe		

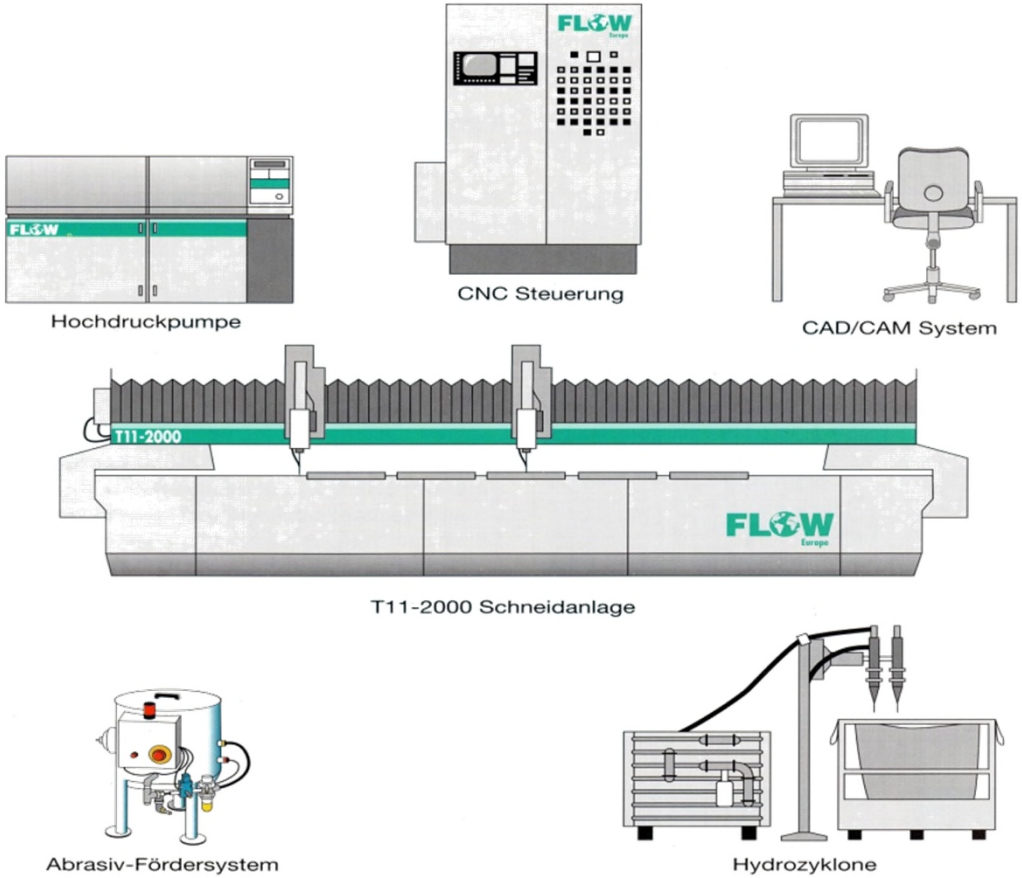
Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Schnittflächenqualität

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
					
Maßhaltigkeit an der Teiloberkante [mm]	+/- 0,2	+/- 0,1			+/- 0,05
Winkelfehler u [mm]	>0,30	<0,30	<0,20	<0,10	<0,05
Oberflächengüte [µm]	50	25	12,5	6,3	3,2
Glattanteil beim Schnitt [%]	20 %			50 - 60 %	80 %
Bemerkungen	Kantenqualität spielt keine Rolle		allgemeiner Maschinenbau, gute Qualität, wirtschaftlich sinnvoll		Teile mit technisch oder optisch sehr hohen Anforderungen

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Komponenten einer Wasserstrahl-Schneidanlage

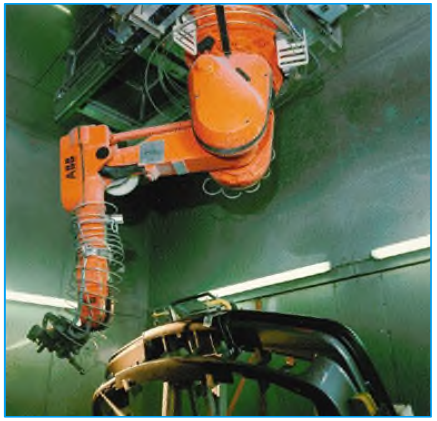


Quelle: FLOW

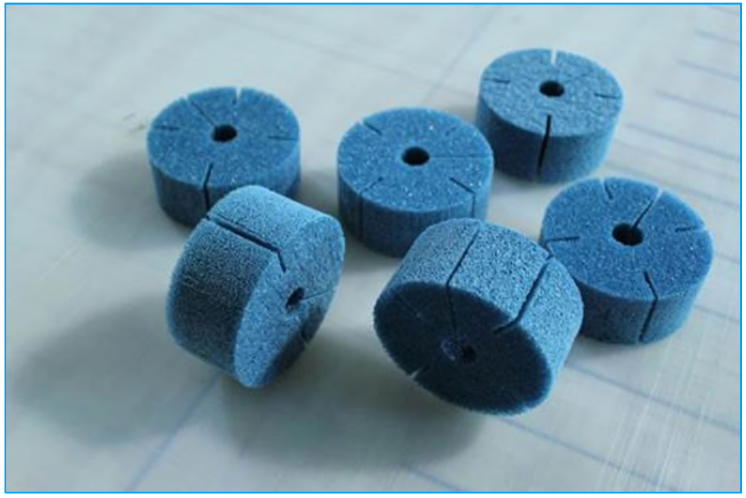
- Hochdruckpumpe / Drucküberset zer
- HD-Schneidventil
- HD-Verrohrung
- Abrasiv-Schneidkopf
- Abrasiv-Management
- Führungssystem
- CNC-Steuerung
- CAD/CAM System
- Entschlammungsanlage und Fest-/Flüssigtrennung
- Abrasiventsorgung / Recycling

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Anlagenbeispiele



- WJ-Anlagen mit Industrieroboter
- 2D / 3D WJ-Anlagen
- Kombi.-Anlagen
- Spezielle Reinwasser-Schneidsysteme (2D) mit bis zu 15 Düsen für hohe Stückzahlen



Quelle: WARICUT

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Anlagenbeispiele

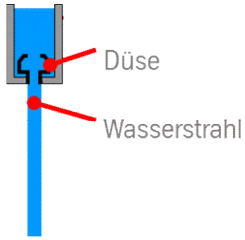
Quelle: Expert Systemtechnik GmbH

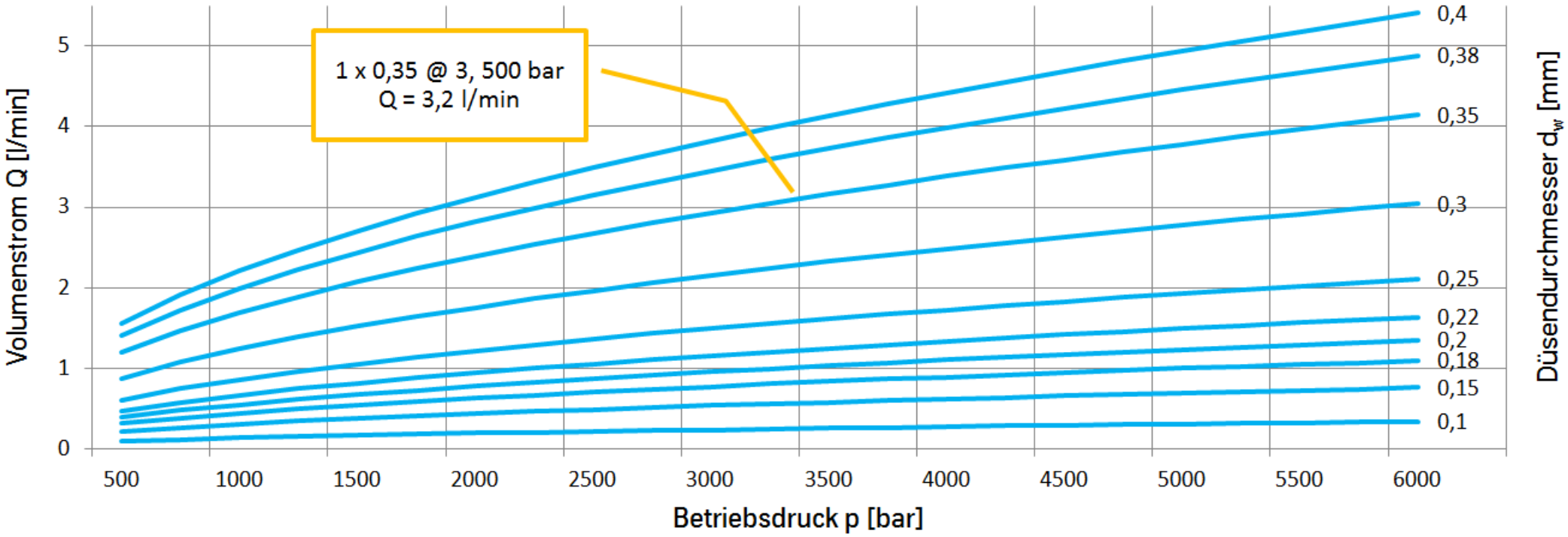
Reinwasserstrahlschneidanlagen mit Sondertischen (Materialauflagen):

- Expert Variojet:
  geeignet für Platten- wie Rollenmaterial
- Wabenmaterial:
  Jet-Catcher zur Reduzierung von Rückspritzern und Feuchtigkeit
- Draht-Conveyor:
  rückspritzarm, verschleißfrei

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Ermittlung des Volumenstroms



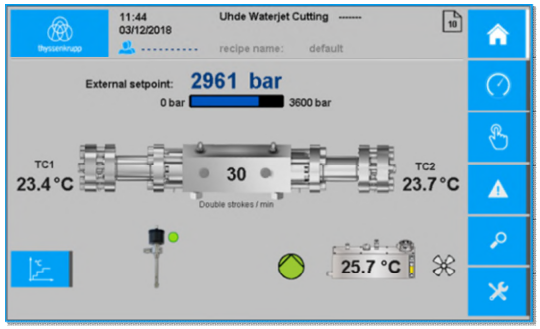


Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Technische Daten / 7. Generation Uhde Waterjet Pumpen

Düsen-Ø [mm]	Uhde 4011	Uhde 4015	Uhde 4022	Uhde 4037	Uhde 4045
0,10	4*	5	8	13	15
0,12	3*	3	5	9	10
0,15	1*	2	3	6	7
0,18	1*	1	2	4	4
0,20	1*	1	2	3	3
0,22	-	1	1	2	3
0,25	-	-	1	2	2
0,28	-	-	1	1	2
0,30	-	-	-	1	1
0,33	-	-	-	1	1
0,35	-	-	-	1	1
0,38	-	-	-	-	1
0,40	-	-	-	-	1*

Daten ermittelt für einen Betriebsdruck
von 3.800 bar bzw. * 3,500 bar



		Uhde 4011	Uhde 4015	Uhde 4022	Uhde 4037	Uhde 4045
Leistung	[kW]	11	15	22	37	45
Designdruck	[bar]	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Betriebsdruck	[bar]	3.500	3.800	3.800	3.800	3.800
Volumenstrom	[l/min]	1,2	1,5	2,3	3,8	4,3
HD Pulsationsdämpfer	[l]	1	1	2,0	2,6	2,6
Max. Düsen-Ø	[mm]	0,2	0,23	0,28	0,35	0,4

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

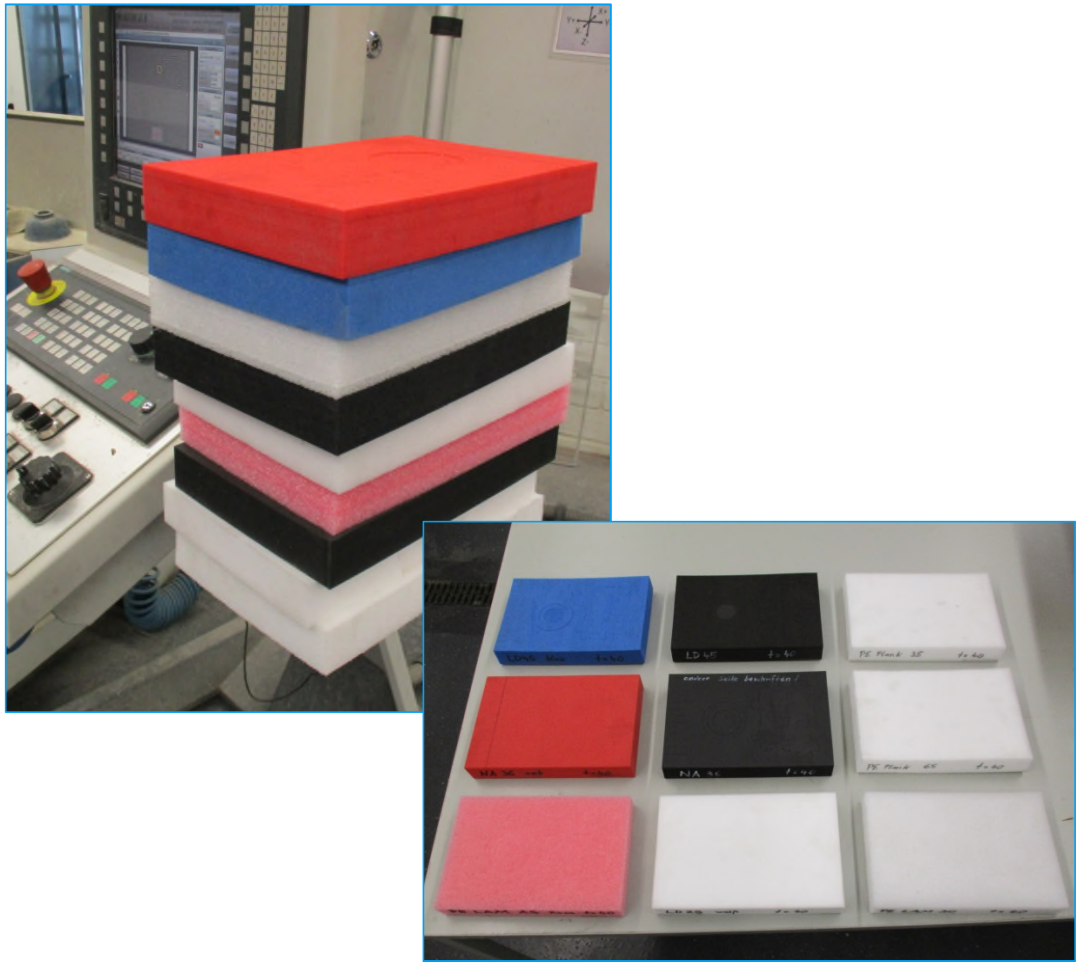
Schneidversuche / Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit

- Schneidversuche trotz Datenbanken, Kalkulationsprogramme und APP‘s
- Parameteroptimierung im Uhde HPT Waterjet-Schneidlabor (bis 6 kbar)
- Beispiel: Schiffsbau (Submarines); Spezialschaumstoff

Test	1	2	3	4	5	6	7
Düse [mm]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25	0,30
p [bar]	3.500	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
v [m/min]	50	50	25	10	10	25	25

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

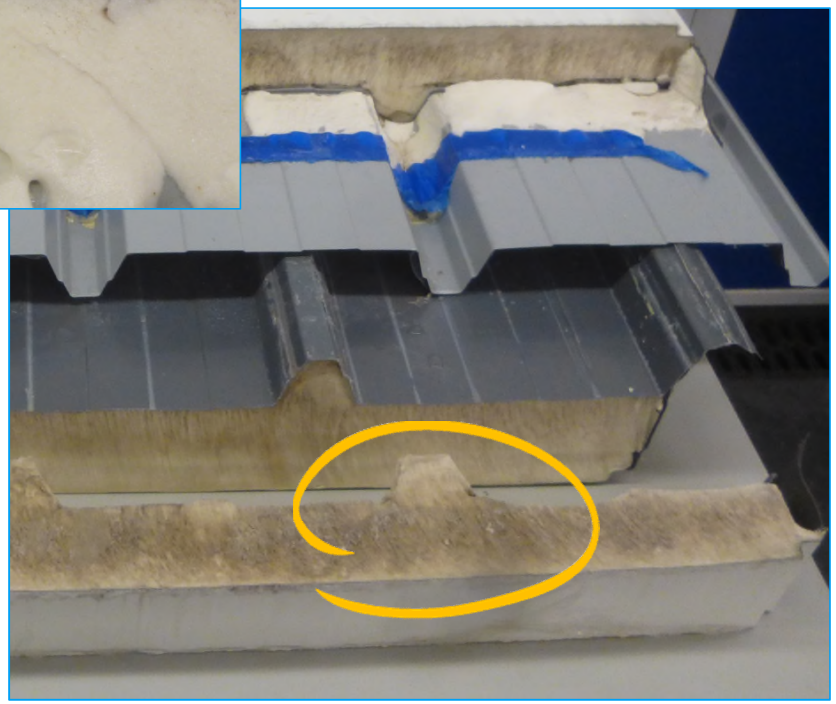
Schneidversuche / Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit



- Kunde mit diversen Schaumstoffprodukten
- Das Schneidverfahren sollte für die gesamte Produktpalette qualifiziert werden
- Qualitätskriterien
  - Oberflächenrauheit der Trennfläche (Riefenbildung)
  - Schnittwinkelfehler
  - Eckenradius und Eckenfehler
  - Anschnitt- und Endschnittfehler
- Optimierungskriterien:
  - Wirtschaftlichkeit
  - Leistung
  - Präzision
- **Ergebnis**: geforderte Prozeßdaten wurden erreicht

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

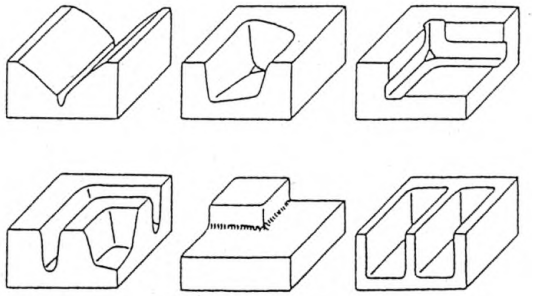
Schneidversuche / Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit

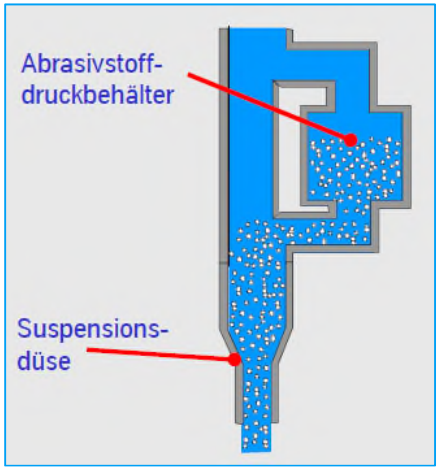


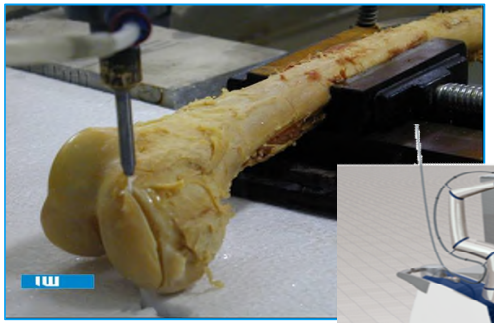
- Sandwich-Materialien: Wandelemente
- Ablängen im Produktionsprozess
- Nur mit dem Abrasivstrahl möglich:
  - Deckbleche konnten durchtrennt werden
  - 3600 bar
  - 0,30 / 1,0 mm Düsenkombination
  - 2 m/min
- Abrasivpartikel im Schaum
- Schaum spült sich aus

Hochdruck nutzbar machen – der Wasserstrahl als universelles Schneidmittel

Zukunftsaussichten / R&D







Quelle: IW Hannover

- Wasserabrasiv-Suspensionsstrahl-Schneiden
  - Abrasiv wird unter Druck dem Strahl beigemischt
  - hoher Wirkungsgrad / Leistungsdichte
  - Batch-Betrieb (bislang nicht kontinuierlich)
- Fräsen mit dem Wasserstrahl (gezielter Tiefenabtrag)
  - Problem: Erzeugung gleichmäßiger Tiefenprofile
  - Frästiefe ist eine Funktion sehr vieler Parameter
- Medizinische Anwendungen
  - Orthopädische Chirurgie
  - Prothesenentfernung / Knochenimplantate
- Industrie 4.0
- Prädiktive Wartung