

Autogenes Brennschneiden: Mehr als 100 Jahre Forschung und Anwendung

Oxy-Fuel Cutting: More than 100 years of development and application

Ralf Verseemann, Essen / D

Das autogene Brennschneiden ist seit mehr als 100 Jahren ein etabliertes thermisches Schneidverfahren mit einem breiten Anwendungsspektrum über einen großen Blechdickenbereich. Über diesen langen Zeitraum gab es eine Vielzahl von technologischen Entwicklungen für den Einsatz des Verfahrens sowohl an Luft als auch unter Wasser. Wesentliche Impulse für die Entwicklung des autogenen Brennschneidens gingen von einem zunehmend vertieften Prozessverständnis aus. Aus diesem Grund werden im Folgenden zunächst ausgewählte Arbeiten zu diesem Themenkomplex und insbesondere Ansätze und Entwicklungen zur Steigerung der Schneidgeschwindigkeit beschrieben. Anschließend wird die Entwicklung und Anwendung des autogenen Brennschneidens an Luft und unter Wasser anhand der drei Einsatzbereiche der blechverarbeitenden Industrie, der Offshore-Industrie und dem Rückbau kerntechnischer Anlagen dargestellt.

Oxy-Fuel Cutting has been a well established thermal cutting process for more than 100 years covering a broad range of applications and material thicknesses. During this extended period of time, there have been achieved a multitude of technological developments regarding the application of the Oxy-Fuel Cutting process on air as well as under water. Significant impulses for the progress of this technology have come from a deepened understanding of its underlying principles. For this reason, in the following selected scientific publications dealing with this subject are presented. Subsequently, the development and the modus operandi of Oxy-Fuel Cutting on air and under submerged conditions are pictured by three different applications: Firstly an appliance within the sheet metal industry, secondly within the offshore industry and last but not least concerning the decommissioning of nuclear facilities.

1 Die Geburtsstunde des Autogenen Brennschneidens

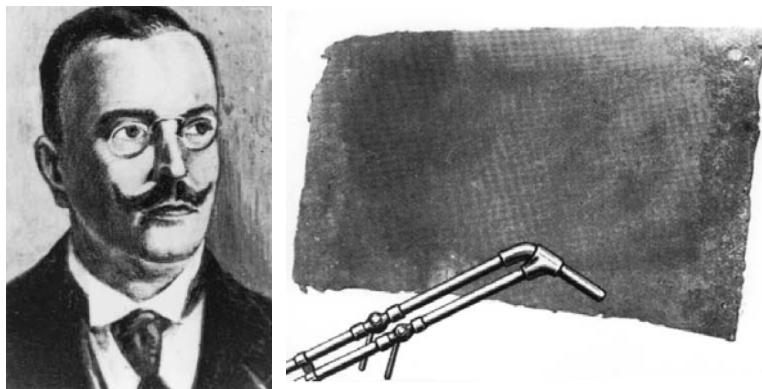


Abb. 1: Ursprung der autogenen Brennschneidtechnik [2]
links: Dr. Ernst Menne, 1869 - 1927
rechts: Fletscherbrenner und Tresorteil eines versuchten Bankraubs in der niedersächsischen Bank in Hannover 1890

Den Grundstein für die Brennschneidtechnik legte der Chemiker Dr. Ernst Menne (**Abb. 1, links**) 1902 in Deutschland unter Verwendung von Wasserstoffbrennern mit starkem Sauerstoffüberschuss zum Aufschmelzen von Hochofenabstichöffnungen [1]. Bereits zuvor entwickelte der englische Ingenieur Fletscher 1887 einen Gas-Sauerstoff-Gebläsebrenner, mit dem u.a. 1890 ein Bankeinbruch in die Niedersächsische Bank in Hannover verübt wurde. Leuchtgas diente hierbei als Brenngas, das Blech wurde jedoch nicht verbrannt sondern geschmolzen (**Abb. 1, rechts**) [2]. 1903 wurde von Fouché der erste aus Frankreich stammende Schweißbrenner mit dem Brenngas Acetylen patentiert [3],[4]. Mit der Patentierung des autogenen¹⁾ Brennschneidens 1904 [4] begann die Entwicklung des Schneidverfahrens

als industrielles Fertigungsverfahren. Bereits 1908 wurde der erste Acetylen-Sauerstoff-Schneidbrenner mit Ringdüsen vorgestellt. Annähernd gleichzeitig wurde 1906 die erste Längsschneidmaschine entwickelt sowie 1913 erstmalig eine Kreisschneidmaschine und eine Führungsmaschine mit elektrischem Antrieb auf einer Schablone eingesetzt [3].

2 Theorie des Autogenen Brennschneidens

Das autogene Brennschneiden von un- und niedriglegierten Stählen wurde ohne endgültige Klärung des Ablaufes des Schneidprozesses in der Vergangenheit mehrfach empirisch und theoretisch analysiert. Bereits 1912 untersuchte Plieninger an einem Wasserstoff-Sauerstoff-Schneidbrenner Schneidgeschwindigkeit, Gasverbrauch und

¹⁾ „autogen“ (griechisch: „autogène“) bedeutet „selbsterzeugend“: Der Begriff „autogen“ wurde erstmals 1840 von Dingler im „Polytechnischen Journal“ bei der Beschreibung einer französischen schweißtechnischen Erfindung genannt. Bei der Erfindung wurden Platten und Röhren aus Blei oder anderen Metallen durch Zusammenschmelzen mit einer Wasserstoff-Sauerstoff-Flamme ohne Zusatzwerkstoff, daher „selbsterzeugend“, miteinander verbunden. „Autogen“ wird im heutigen Sprachgebrauch verallgemeinert im Zusammenhang mit Fertigungsverfahren verwendet, die sich der Verbrennungswärme von größtenteils Brenngas-Sauerstoff-Flammen bedienen.

Schnittrillennachlauf beim Brennschneiden in Abhängigkeit von Sauerstofffreiheit sowie von Sauerstoff- und Werkstückvorwärmung [5].

Malz [6] bestimmte 1932 blechdickenabhängig die kritische Schneidgeschwindigkeit und den kritischen Schneiddruck²⁾. Chemische Untersuchungen der Oxidationsprozesse führten zur Bestimmung der chemisch wirksamen Sauerstoffmenge und in Verbindung mit der Ermittlung der Heizflammenwärme zur Quantifizierung endo- und exotherm eingebrachter Energien. Malz stellte fest, dass im Blechdickenbereich oberhalb 40 mm die Verbrennungs-wärme den 5 bis 7fachen Wert des Heizflammenanteils annimmt. Mit Hilfe von Zeitlupenschlierenaufnahmen bei brennenden Heizflammen wurde von Malz [6] und Zobel [7] die druckabhängige Ausbildung der Sauerstoffstrahlkontur und das Verhalten des Schneidstrahls beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche analysiert.

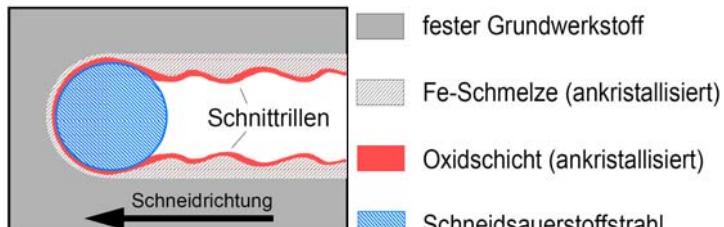


Abb. 2: Schnittrillenentstehung nach von Hofe [9]

Farbfilmzeitlupenaufnahmen des Schneidprozesses führten 1943/44 zur Theorie des Ablaufes des Brennschneidvorganges in Schneidrichtung und zur Beschreibung der Entstehungsmechanismen von Schnittrillen nach Pfleiderer [8], die 1967 von von Hofe [9] weiterentwickelt wurden (**Abb. 2**). Aufgrund des höheren Schmelzpunktes des flüssigen Eisens kristallisiert der aufgeschmolzene Grundwerkstoff unter einer überhitzten flüssigen und damit reaktionsfreudigen Oxidschicht. Das

daraus resultierende partielle Anschmelzen der wiederankristallisierten Schicht begünstigt die prozessbedingte Schnittrillenbildung durch die exotherme Energie der ablaufenden Folgeoxidation des FeO zu Fe₃O₄ und Fe₂O₃ [9]. Die Schichtdicke der ankristallisierten Schmelzenschicht beträgt nach eigenen lichtmikroskopischen Gefügeuntersuchungen und nach Gruchow [10] ca. 10 bis 15 µm. Langwellige Schnittrillen größerer Amplitude werden durch die Maschinendynamik initiiert, die im wesentlichen durch die Steifigkeit der Führungsmaschine inklusive der Brennerhalterung und der Werkstückauflage charakterisiert werden kann. Transversalwellenanteile führen dabei direkt und Longitudinalwellenanteile indirekt durch varierende Schneidgeschwindigkeiten und Verweildauern an einer Schneidstelle zu ungleichmäßigem Werkstoffabtrag [11],[12]. Neuere Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen aus

Japan von Ogawa belegen anhand der Visualisierung eines wasserfallartigen Abfließens der Schmelze die Theorie der Schnittrillenbildung.

Auf der Grundlage der kinetischen Gastheorie und der Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit von der Stoßzahl³⁾ der Sauerstoffteilchen gab Teske 1954 erstmals eine maximale Schneidgeschwindigkeit von 4,3 m/min an [13].

Experimentelle und pyrometrische Untersuchungen führten zu Angaben über Zündtemperaturen für un- und niedriglegierte Stähle sowie zur Bestimmung der Schlacketemperatur. Unberücksichtigt blieben der Abtransport der Verbrennungsprodukte aus der Fuge, Randbedingungen wie Gasstrahlparameter und Blechdicke sowie der Einfluss der Sauerstofffreiheit.

Von Hofe et al. [9] entwickelten 1967 ein Modell zur Beschreibung des Brennschneidvorganges in Schnittdickenrichtung, das von Boschnakow anhand von Messungen der Sauerstofffreiheit und der Strömungsgeschwindigkeit in der Brennschnittfuge verifiziert wurde. Bis zu einer Tiefe von ca. 2/3 der Schnittdicke überwiegt die Oxidation. Aufgrund des Aufzehrens des Schneidsauerstoffs ist im unteren Schnittdickendrittel der Schmelzvorgang von primärer Bedeutung. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass die erreichbare Schneidgeschwindigkeit umso höher ist, je kälter der Schneidsauerstoffstrahl am Düseingang und je höher der Schneidsauerstoffdruck ist. Zudem gewinnt der Schneidstrahl durch Einschnürung und Stabilisierung durch die Heizflamme an Reichweite, wodurch Schnittdicken größer 300 mm erst möglich sind [14].

² Kritische Schneidgeschwindigkeit und kritischer Schneiddruck kennzeichnen die Werte, ab denen ein Rillennachlauf nicht zu vermeiden ist.

³ Als Stoßzahl wird die Anzahl der pro Zeiteinheit (s) auf eine Reaktionsfläche von 1 cm² auftreffenden Sauerstoffteilchen bezeichnet.

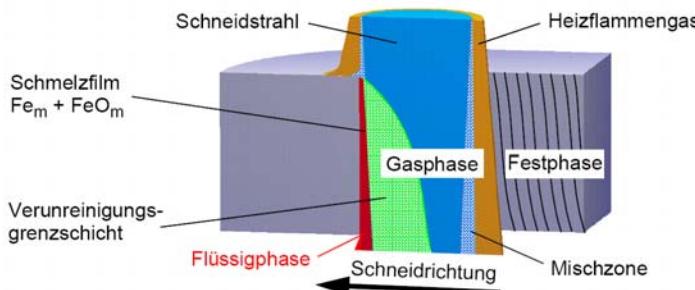


Abb. 3: Brennschneidmodell nach Boschnakow [15]

Messungen der Temperaturverteilung im Werkstück [16] sowie anhand von Schlackeanalysen und Messungen des Sauerstoffausnutzungsgrades [9],[17].

Auf der Basis energetischer Betrachtungen leitete Irmer [18] 1985 die metallurgische Beeinflussung schnittflankennaher Werkstoffbereiche ab und analysierte deren Einfluss auf eine anschließende schweißtechnische Weiterverarbeitung. 1987 setzte Stutzenberger [19] die Numerik auf der Basis der Finiten Elemente Methode erstmals zur Berechnung der Temperaturverteilung beim Aufheizen eines Werkstückes durch eine Autogenflamme ein.

In Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Überschallschneidstrahl und Schneidfront beschreiben Matsuyama et al. mit Hilfe von schlierenoptischen Aufnahmen die Abhängigkeiten zwischen dem Stoßwellenverhalten und der Schneidgeschwindigkeit [20],[21].

Untersuchungen zum Laserstrahlbrennschneiden von Franke [22] stehen im Widerspruch zum turbulenten Strömungsmodell nach Boschnakow [15]. Danach ist die Diffusion der Reaktionspartner durch die Eisenoxidschmelze theoretisch schnell genug, um die Reaktionskinetik bei genügend hoher Sauerstofffreiheit bestimmen zu können. Wesentlich ist, dass nach Kawai [23] Diffusionsprozesse in Schmelzen wesentlich schneller ablaufen als in Festkörpern.

Zur weiteren Analyse des Schneidprozesses traf Heidenreich [24] 1995 mit Hilfe schlierenoptischer Aufnahmen und Druckmessungen Aussagen über Strahlgeschwindigkeiten sowie das Verhalten des Schneidstrahles in der Schnittfuge. Quintessenz ist, dass für einen verbesserten Schmelzenaustritt der Schneidgasstrahl vollständig an der Schneidfront anliegen muss. Analysen der Verbrennungsmechanismen ergaben für das Laserstrahlbrennschneiden, dass ein lang anliegender Schneidstrahl in Verbindung mit einer geringen Schmelzfilmdicke und gleichmäßig entlang der Schneidfront eingekoppelter Laserleistung zu einer Prozessstabilisierung beiträgt und dass analog zum autogenen Brennschneiden [18] die Schnittflankenrandbereiche aufkohlen.

Anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des autogenen Brennschneidens entwickelte Danzer [25] 1997 ein völlig neues Modell des Brennschneidprozesses. Er postulierte eine so genannte „stille Oxidation“ in der Schnittfuge. Dieser Vorgang, bei dem Ladungen und nicht Atome bewegt werden, läuft wesentlich schneller ab als die Diffusion des Eisens und Sauerstoffes durch die FeO-Schmelzenschicht. Diese Betrachtung wird gestützt durch die metallographischen Untersuchungen der wiederankristallisierten Schlacke-/Schmelzenschicht. Der langsamste Schritt bei dem Prozess ist dieser Theorie nach das Hinführen des gasförmigen Sauerstoffs durch eine Verunreinigungsgrenzschicht zur Schlackeoberfläche.

Die Schneidgeschwindigkeit wird jeweils von dem physikalischen oder chemischen Vorgang begrenzt, der am langsamsten abläuft. Abgeleitet aus den theoretischen Betrachtungen zum Prozessablauf sind in **Abb. 4** die Einflussfaktoren auf den Schneidprozess dargestellt, aus denen sich eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit ableiten lässt [26],[27].

Bei einer Erhöhung des Schneidsauerstoffdruckes und der daraus resultierenden Erhöhung der Strahlgeschwindigkeit beruht die Steigerung der Schneidgeschwindigkeit auf [26]:

- einer Zunahme des Sauerstoffangebotes in der Schnittfuge infolge einer Verringerung der Temperatur und Erhöhung der Dichte des Schneidstrahls,
- einer Verbesserung des Stoffaustausches in der FeO-Schicht durch eine Verringerung der Dicke der Verunreinigungsgrenzschicht sowie
- einer Zunahme der Schlackeabtransportgeschwindigkeit durch Erhöhung der Scherkraft auf die Oberfläche der abfließenden FeO-Schmelze.

Boschnakow [15] etablierte 1974 eine detaillierte Beschreibung des Brennschneidprozesses an Stahl durch eine differenzierte Betrachtung der physikalischen Teilvergänge in der Gas-, Flüssig- und Festphase (**Abb. 3**). Aufgrund von Berechnungen von Diffusionszeiten des Sauerstoffes und des Eisens durch die Oxidschicht in der Flüssigphase schloss er auf ein turbulentes Strömungsmodell, so dass der Brennschneidprozess nur durch eine Verunreinigungsgrenzschicht im Schneidgasstrahl gehemmt wird.

Experimentell erfolgte eine Analyse der endotherm und exotherm eingebrachten Energie mit Hilfe von

Versuche in den 80er Jahren zum Brennschneiden von Brammen mit tiefkaltem flüssigem Sauerstoff, (LOXJET® - Liquid oxygen (LOX) and high pressure provide a high-energy cutting jet (JET)) verdeutlichen den Zusammenhang zwischen der Werkstofftemperatur bzw. Werkstoffvorwärmung und der Temperatur des Schneidsauerstoffs [28]. Die Brammentemperatur gewährleistet trotz des tiefkalten Flüssigsauerstoffs permanent das Erreichen der Zündtemperatur an der Schneidfront. In Kombination mit einem vorlaufenden autogenen oder Plasma-Vorwärmbrunner konnten die Schneidgeschwindigkeiten an kaltem Material verdreifacht und beim Warmtrennen von Stranggussmaterial vervierfacht werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der Verunreinigungsgrenzschichtdicke im Schneidsauerstoffstrahl ist die Erhöhung der Sauerstoffreinheit. Untersuchungen mit gezielt durch die Gase Helium, Stickstoff, Argon, Kohlendioxid und Krypton verunreinigtem Schneidsauerstoff mit Reinheitsgraden zwischen 96,85% und 100% ergaben, dass Gase kleiner Dichte, wie Wasserstoff ($0,0899 \text{ kg/m}^3$), einen bedeutend geringeren Einfluss auf die Qualitätskriterien Rillennachlauf und Rechtwinkligkeitstoleranz sowie Hohlheit haben als Gase hoher Dichte, wie Krypton ($3,680 \text{ kg/m}^3$). Eine signifikante Abhängigkeit zwischen der Verunreinigung und der gemittelten Rautiefe konnte nicht detektiert werden [17].

Ein weiterer Ansatz zur Steigerung der Schneidgeschwindigkeit ist das Anstellen des Brenners gegen die Schneidrichtung, das auch als stehendes Schneiden bezeichnet wird. Das Anstellen führt zu einer Erhöhung der Anlagedicke des Schneidstrahls am Werkstück und zu einem intensiveren Vorwärmern der Schneidfront [27].

Dem Einsatz von Mehrstrahldüsen zur Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit liegt der Gedanke zugrunde, Qualitätsschnitte in einem Trenn- und einem Glättungsprozess zu erzeugen. Ein vorlaufender erster Schneidstrahl trennt das Material mit Grenzgeschwindigkeit aber schlechter Schnittqualität. Der nachfolgende zweite und ggf. dritte Schneidstrahl hat die Aufgabe, die vom ersten Schneidstrahl aufgewärmte Schnittfläche bei gleicher Schneidgeschwindigkeit mit höherer Schnittqualität nachzuschneiden [15],[26].

Mit der Sauerstoffvorhangdüse [29] kann die Reinheit des Sauerstoffstrahls erhöht und die Dicke der Verunreinigungsgrenzschicht verringert werden. Dies wird durch das Abschirmen des Schneidstrahls von der ihn umgebenden Heizflamme mit Hilfe eines Sauerstoffschielers erreicht. Die Reichweite des Sauerstoffvorhangs in Blechdickenrichtung ist begrenzt, so dass diese Düsen bis zu einer Blechdicke von 80 mm eingesetzt werden.

Eine Beschleunigung des Oxidationsvorganges beim Brennschneiden kann auf chemischem Wege durch Zuführung von Katalysatoren, Flüssmitteln und Reaktionsaktivelementen erzielt werden. Eine Erhöhung der Reaktionswärme und Reaktionstemperatur wird beispielsweise durch Verwendung von Fe-Al-Pulvern, wie sie beim Pulverbrennschneiden von hochlegiertem Stahl und Grauguss eingesetzt werden, erreicht. Die gegenüber FeO mit 268 KJ/mol mehr als 6fache Bildungswärme des Al_2O_3 von 1675 KJ/mol führt zu verbesserter Energieeinbringung. Durch den hohen Schmelzpunkt des Al_2O_3 wird zusätzlich eine abrasive Wirkung erzielt, jedoch wird auch der Schmelzpunkt der Schneidschlacke erhöht. Die Zugabe von Natriumkarbonaten führt aufgrund der niedrigen Schmelztemperatur der entstehenden Oxide zu einer Senkung des Schmelzpunktes der Schlacke und damit zu einem verbesserten Schmelzenaustrieb [26].

Aufgrund des höheren Aktivitätspotentials, charakterisiert durch die Elektronegativität, reagieren halogene Gase wie Fluor und Chlor mit Metallen intensiver als Sauerstoff. Quantitativ ergibt sich eine erhöhte Bildungswärme von 704 kJ/mol FeF_2 und 984 kJ/mol für FeF_3 gegenüber 268 kJ/mol für FeO und 1122 kJ/mol für Fe_3O_4 . Die Bildung von extrem gesundheitsschädlichen Fluor- und Chlorverbindungen (z. B. Fluorwasserstoffe) und die damit verbundenen strengen Schutzmaßnahmen verhinderten eine praktische Umsetzung.

Die effektivste Schneidgeschwindigkeitssteigerung an Atmosphäre und unter Wasser ist durch das Anstellen des Brenners beim stehenden Schneiden und durch Erhöhung des Schneidsauerstoffdruckes zu erwarten. Das stehende Schneiden eignet sich am besten für Besäumschnitte und nur mit mehrachsiger Brennerführung für das Zuschneiden von Formteilen. Studien in den 90er Jahren für Blechdicken von 10 bis 40 mm bestätigen, dass sich mit Hochdruckschneiddüsen die Schneidgeschwindigkeiten zwischen 15 und 30% steigern lassen. Zentraler Gesichtspunkt bei der Auslegung und Konstruktion der Düsenkanäle ist ein erhöhter Schneidsauerstoffvolumenstrom. Dieser wirkt sich besonders bei Konturschnitten positiv auf das Schneidergebnis aus. Trotz höheren Sauerstoffbedarfs senken Hochdruckdüsen die Kosten in Bezug auf die Schnittlänge. Darüber hinaus ist eine Verkleinerung der Wärmeeinflusszone erzielbar [30].

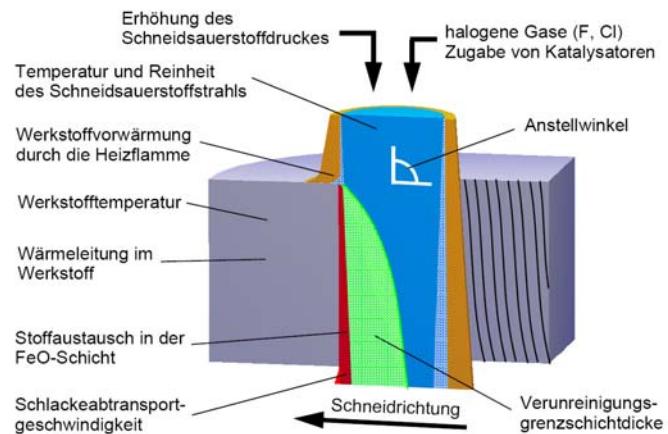


Abb. 4: Möglichkeiten der Steigerung der Schneidgeschwindigkeit [26],[27]

3 Anwendungen und Entwicklungen zum Autogenen Brennschneiden

3.1 Blechverarbeitende Industrie



Abb. 5: Anwendungen des mechanisierten autogenen Brennschneidens in der blechverarbeitenden Industrie, von links nach rechts: Mehrbrennereinsatz, Roboterschneiden, Drei-Brenneraggregat zum Fasenscheiden, manuelles/mechanisiertes Schneiden [Firmenprospekte Messer Cutting & Welding, ESAB, REIS]

Die aktuellen Entwicklungen zum autogenen Brennschneiden für die blechverarbeitende Industrie sind gekennzeichnet durch Maßnahmen der Prozessautomation zur Produktivitätssteigerung und zur Integration der Brennschneidanlagen in komplexe Fertigungsabläufe. Besondere wirtschaftliche Vorteile gegenüber konkurrierenden Verfahren werden durch den parallelen Einsatz von mehreren Brennern erreicht. Das Fertigen von I-, V-, Y-, und DY-Schnittflanken mit Ein- und Mehrbrenneraggregaten ist seit langem Stand der Technik (**Abb. 5**) [31].

Als Ergänzung zu stationären Brennschneidanlagen zur Schweißkantenvorbereitung und als flexibles Werkzeug werden tragbare, manuell oder maschinell geführte Brennschneidmaschinen verwendet (**Abb. 5 rechts**). Für räumliche Bearbeitungen, beispielsweise von L-, Flach- und Hollandprofilen, kommen modulare, meist roboterbasierte Anlagenlösungen zum Einsatz (**Abb. 5, Mitte**).

Die in diesem Zusammenhang geforderten Schneidleistungen bei gleichzeitig hohen Bauteilgenauigkeiten werden im wesentlichen durch die Charakteristika der Schneiddüse, der Brennschneidmaschine, der verwendeten Gase und des zu schneidendem Werkstoffes bestimmt. Tendenziell setzen sich auf dem Gebiet der Maschinenschneidbrenner nach dem Injektorprinzip aufgebaute zweiteilige Schlitzdüsen mit lavalförmigem Schneidkanal sowie nach dem Druckprinzip konzipierte ein- oder zweiteilige gasemischende Düsen durch. Bei den Lavaldüsen werden zum Austreiben der schmelzflüssigen Phase Gasgeschwindigkeiten bis zur 1,6fachen Schallgeschwindigkeit erreicht. Bei Sauerstoffvorhangdüsen kann mit Hilfe eines Sauerstoffschleiers um den Schneidstrahl dessen Stabilität und Reinheit zur Steigerung der Schneidgeschwindigkeit erhöht werden [26].

Als Maschinenschneidbrenner bis 300 mm Blechdicke kommen im automatisierten Brennschneidprozess sowohl Druck- und Injektorbrenner mit externer Zündung als auch innenzündende Brenner (**Abb. 7, links**) zum Einsatz. Letztere bieten mit Hilfe optischer Sensoren in Verbindung mit einer elektronischen Gasmengenregelung gleichzeitig die Möglichkeit der Prozessdiagnose und -regelung [26],[32],[33].

Neben der Regelung der Gasdrücke sind CNC-gesteuerte Brennschneidmaschinen gekennzeichnet durch

- die Verarbeitung von Prozesssignalen zur kapazitiven (an Luft) und induktiven (auf Wassertischen) Brennerabstandsregelung, wobei bei neuesten Entwicklungen die Funktion der Höhenregelung bereits in die Düse integriert ist [34],
- Betrieb unterschiedlicher Verfahren an einer Anlage mit automatischer Verfahrens-/Brennerauswahl und Brennerhöhenverstellung [31],
- eine hohe Maschinendynamik mit Konturschneidgeschwindigkeiten bis 20 m/min bei gleichzeitig hoher Positioniergenauigkeit sowie
- die Verwaltung von Schneidtabellen in Form einer Technologie-Datenbank und Schneidprotokollen zur Qualitätsdokumentation im Zuge der Zertifizierung nach DIN EN ISO 9000 ff.



Abb. 6: Dickblechbrennschneiden, Schnittdicke: 3200 mm [SLV Halle]

In den 90er Jahren erfolgte basierend auf der Technologie der innenzündenden Brenner und der Entwicklung spezieller Hüllgaskappen die Qualifizierung des automatisierten autogenen Brennschneidens unter Wasser (**Abb. 7**). Bei vergleichbarer Schnittqualität wurden im Blechdickenbereich zwischen 10 und 100 mm 10 – 15% geringere Schnidgeschwindigkeiten erzielt. Für die blechverarbeitende Industrie kann im Zuge der Humanisierung am Arbeitsplatz der Lärmpegel durch eine Wasserabdeckung von 20 cm um bis zu 30 dB(A) gesenkt werden. Gleichzeitig kann durch die Wasserabdeckung analog zum Plasmaschneiden die effektivste Reduzierung der Aerosole und Gase erzielt werden und das Wasser filtert zudem die Strahlung [26].

3.2 Unter Wasser - Offshore-Industrie

Sowohl für den Hafen-, Brücken- und Tiefbau als auch für Bergungs- und Reparaturarbeiten an Schiffskörpern wurde das autogene Brennschneiden unter Wasser mit Beginn des 20. Jahrhunderts schnell zu einem manuellen Zerlegeverfahren weiterentwickelt. Mit einem konventionellen Atmosphären-Schneidbrenner wurden bereits 1908 erstmals Trennschnitte unter Wasser durchgeführt [37]. Durch Bollweg (1909) und Andres (1912) erfolgten die ersten Patentanmeldungen für autogene Unterwasserschneidbrenner [38]. Kennzeichnend für alle deutschen Entwicklungen war die konstruktive Modifikation der Schneiddüse, beispielsweise durch konisch gestaltete Düsenmündungen.

Die Defizite hinsichtlich der Stabilität der Verbrennung unter Wasser konnten 1913 durch Konsbak [38] mit der Entwicklung einer die Heizflamme umgebenden Schutzkappe beseitigt werden. Mit Hilfe von eingedüster Druckluft wurde das die Flamme umgebende Wasser verdrängt, wodurch das Brennschneiden unter Wasser Praxisreife erlangte. Parallele Entwicklungen in Deutschland führten zur Patentierung einer Ringdüse [37], die ohne zusätzliche Kappe einen konzentrischen, die Heizflamme umgebenden Druckluftmantel erzeugt. Die Quelle [39] datiert die Erfindung der ersten Hüllgaskappe für Unterwasser-Wasserstoff-Sauerstoff-Brenner durch Ellsberg in den USA auf das Jahr 1925. Als optimalen Schnittdickenbereich für das Wasserstoff- Sauerstoff-Brennschneiden unter Wasser gibt [39] 10 bis 40 mm an, wobei maximale Schnittdicken von 300 mm erreicht wurden.

Der erste Entwicklungszyklus für manuelle, mit Brenngasen betriebene Unterwasserschneidbrenner endet nach [40] Ende der 30er Jahre. Als Brenngase wurden vorzugsweise Acetylen bis 7 m Wassertiefe und Wasserstoff bis 40 m [40] bzw. nach [41] bis 100 m Wassertiefe eingesetzt, wobei für Wasserstoff theoretische Einsatztiefen von 1400 m errechnet wurden. Die Zündung von Brenngas-Schneidbrennern erfolgte durch Zündkerzen mit Druckschaltern, druckgesteuerte Zündpatronen, Glühkerzen zwischen zwei Kohle-elektroden, hochfrequent initiierte Zündfunken und permanent brennende Zündflammen [41].

In der Folgezeit wurden die Brenngase zumindest in Deutschland aufgrund der günstigeren Transporteigenschaften durch flüssige Brennstoffe verdrängt [38]. Der erste Benzin-Unterwasserschneidbrenner wurde 1929 von Töpper [42] in Deutschland patentiert. Flüssige Brennstoffe müssen vor der Verbrennung in den gasförmigen Zustand überführt werden, z. B. durch Verdampfung in elektrischen Heizvorrichtungen, zusätzlichen Heizflammen und

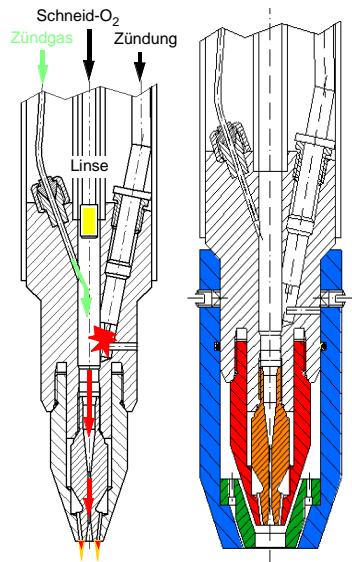


Abb. 7: Innenzündender Brenner (links), mit Hüllgaskappe für den Unterwassereinsatz (rechts)

Wärmerückstauern sowie durch Vernebelung über Prallplatten oder Ejektoren [40]. Aus Sicherheitsgründen werden derartige Brenner über Wasser gezündet. Für das anschließende, umständliche Abtauchen auf Arbeitstiefe wird nach [41] ein wirtschaftlicher Einsatz bis 9 m Wassertiefe angegeben. [37] berichtet von maximalen Einsatztiefen bis 60 m Wassertiefe.

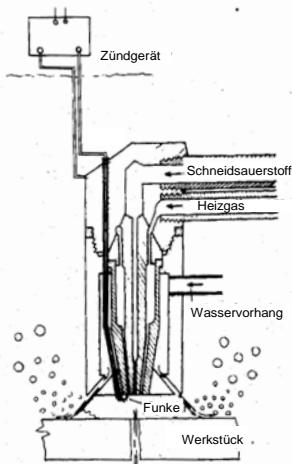


Abb. 8: Unterwasserschneidbrenner mit Wasservorhang [44]

Schnittdicken für gesicherte Trennschnitte wurden in Wassertiefen kleiner 1 m senkrecht entgegen der Auftriebskraft im Wasser 250 mm und horizontal 450 mm erreicht. Aufgrund der geringen Druckstabilität des Brenngases LPG mit Methyl-Acetylen ist dessen Einsatztiefe auf 10 m begrenzt.

Die Untersuchungen von Gruchow [10] zum autogenen Brennschneiden unter Wasser konzentrierten sich auf die Optimierung der Schnittqualität im Blechdickenbereich zwischen 10 und 40 mm für Senkrechtkarbid- und Fasenschnitte für eine Schweißnahtvorbereitung. Mit den verwendeten Schutzgaskappen für eine Hochspannungs-Hochfrequenzzündung und Sauerstoff als Hüllgasmedium wurden mit dem Brenngas Acetylen maximale Einsatztiefen von 10 m erreicht. Zur Beurteilung der Schweißeignung der Nahtvorbereitung wurde die Wärmeeinflusszone anhand von Schliffbildern, Härtmessungen und Bestimmungen des Kohlenstoffgehaltes analysiert.

3.3 Rückbau kerntechnischer Anlagen

Im Bereich des Rückbaus kerntechnischer Anlagen wurde das autogene Brennschneiden fast ausschließlich mit konventionellen Autogen-Schneidaggregaten an Atmosphäre eingesetzt [47]. Hauptanwendungsgebiet ist die manuelle Nachzerlegung von un- und niedriglegierten Stählen sowohl im Bereich der Demontage von Strukturen in Einbauräumen als auch in der Nachzerlegung in gekapselten Zerlegezellen mit lokaler Absaugung zur Erfassung der entstehenden Stäube (**Abb. 9, links**).

Ein besonderer Vorteil der Technologie liegt in der Möglichkeit der rückstellkraftfreien Zerlegung großer Blechdicken bei gleichzeitig hoher Schneidgeschwindigkeit. Für die Zerlegung des Reaktordruckbehälters (RDB) im Kernkraftwerk Gundremmingen Block A wurden Wandstärken von 130 bis max. 390 mm inklusive einer Innenplattierung von 7 mm CrNi-Stahl erfolgreich zerlegt [48]. Dazu wurde zur Brennerführung ein robustes schienengeführtes Handhabungssystem eingesetzt, die entstehenden Aerosole wurden lokal durch abreinigbare Filtersysteme vollständig erfasst. Der Anschnitt erfolgt von der ferritischen Werkstoffseite, wobei die innenliegende austenitische Plättierung durch die abfließende Schlacke aufgeschmolzen wird. **Abb. 9, Mitte** zeigt die mechanisierte Zerlegung des Reaktordruckgefäßes in Gundremmingen. Die überwiegend zu trennende Materialdicke von 131 mm wurde mit einer Schneidgeschwindigkeit von 200 mm/min getrennt (**Abb. 9, rechts**) [48].

Zur Erhöhung der Energieeinbringung und der Druckstabilität unter Wasser wurden in den 60er Jahren in den USA Schneidversuche mit flüssigen Oxidationsmitteln auf der Basis von Chlorflouriden (CTF: chlorine triflouride) durchgeführt. In Verbindung mit dem flüssigen Brennstoff Hydrazin (N_2H_4) konnten unter Wasser Flammenleistungen zum Schmelzscheiden von bis zu 5 mm dicken CrNi-Stählen erreicht werden. Aufgrund des hohen apparativen Aufwandes und Gefahrenpotentials für das Bedienpersonal wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt [43].

Mit der Forcierung der Offshore Öl- und Gasproduktion Mitte der 60er Jahre erfolgten in Japan erste Arbeiten zum mechanisierten, maschinellen autogenen Brennschneiden unter Wasser [44]. Als konstruktive Besonderheit wurde die Heizflamme von einem kegelförmigen Wassermantel konzentrisch umgeben, der durch das Ablösen feinperlicher Gasblasen zu einer Prozessstabilisierung beitrug (**Abb. 8**). Gezündet wurde die aus einem Gemisch aus LPG⁴ mit Methyl-Acetylen und Sauerstoff bestehende Heizflamme mit einem Zündfunken zwischen einem Wolframdraht und der Schneiddüse, initiiert durch ein Hochfrequenz-WIG-Zündgerät. Zur Erhöhung der unter Wasser maximal schneidbaren Blechdicken für den Einsatz in kerntechnischen Anlagen wurde das Schutzmedium Wasser durch Druckluft substituiert [45], [46]. Als größtmögliche

⁴ LPG: "Liquide Propane Gas". LPG ist eine Mischung aus Propan (C_3H_8), Polypropylen (C_3H_6) und Butadien (C_4H_6)



Abb. 9: Anwendungsbeispiele beim Rückbau kerntechnischer Anlagen [47],[48]

links: Manuelle Brennschneiden des Reaktordruckbehälterdeckels

Mitte: Fernhantierte Zerlegung des Reaktordruckbehälters

rechts: Schnittfläche eines Reaktordruckbehältersegmentes

4 Zusammenfassung

Das autogene Brennschneiden ist auch heutzutage aus dem Fertigungsablauf in der blechverarbeitenden Industrie nicht wegzudenken. Aufgrund umfangreicher Entwicklungen beispielsweise im Bereich des Sauerstoffplasmenschneidens und Laserstrahlbrennschneidens wird das autogene Brennschneiden z.B. im Werftbereich jedoch vorrangig ab einer Blechdicke von 25 mm eingesetzt, wobei das Verfahren in der komplexen Schweißnahtvorbereitung mit Drei-Brenner-Aggregaten und dem Zuschneiden von Formteilen mit dem kostengünstigen parallelen Einsatz mehrerer Brenner dominiert. Gleches gilt für den Einsatz manueller Schneidgeräte in der Werftindustrie.

Jüngste Entwicklungen zum autogenen Brennschneiden konzentrierten sich auf die Prozessautomation. Zu nennen sind in dem Zusammenhang insbesondere Entwicklungen bedienerfreundlicher Maschinensteuerungen mit der Verwaltung von Schneidtabellen in Form einer Technologie-Datenbank, der Einsatz von Flammensensoriken und Höhenregelungen, eine deutliche Verbesserung der Maschinendynamik sowie letztlich auch der Betrieb mehrerer unterschiedlicher thermischer Schneidverfahren mit automatischer Verfahrens- und Brennerwahl an einer Anlage.

Neben dem Einsatz in der Blechverarbeitung wird das autogene Brennschneiden ebenfalls beim Rückbau kerntechnischer Anlagen verwendet. Einerseits ermöglichen einfaches Handling und Robustheit eine kostengünstige manuelle Zerlegung von Komponenten vor Ort oder an Nachzerlegplätzen, andererseits ist das kompakte Schneidaggregat prädestiniert für die rückstellkraftfreie, fernhantierte Zerlegung dickwandiger Komponenten, wie z.B. des Reaktordruckbehälters.

Bezüglich der Beschreibung des Prozessablaufes darf darüber spekuliert werden, welche neuen Impulse von dem Einsatz fluidynamischer Rechenprogramme ausgeht und ob es gelingt, speziell die Kombination aus endo- und exothermer Energieeinbringung vollständig zu beschreiben.

5 Literatur

- [1] Ehrenberg, H., F.-D. Hermann u. H. Jansen: Was man über das autogene Brennschneiden wissen sollte. Mitteilungen der BEFA 29, Nr. 11, 1978
- [2] Beckert, M.: Aus der Geschichte des autogenen Brennschneidens. Schweißen und Schneiden 53, Heft 2, S. 93-94, 2001
- [3] Vanschen, W.: Vom autogenen Brennschneiden bis zum Elektronenstrahlbohren. Der Praktiker, Heft 11, S. 668-674, 1993
- [4] Gutermann, T.: Autogenes Brennschneiden - es begann vor 75 Jahren. Der Praktiker, Heft 9, S. 244-247, 1979
- [5] Plieninger, R.: Untersuchungen über das autogene Schneidverfahren. Dissertation TH Karlsruhe, 1912
- [6] Malz, H.: Die Grenzen der Schneidgeschwindigkeit beim Brennschneiden. Dissertation TH Berlin-Charlottenburg, Buchdruckerei Konrad Tritsch, Würzburg, 1932
- [7] Zobel, R.: Erhöhung der Schneidgeschwindigkeiten beim Brennschneiden durch neue Düsenformen. Dissertation TH Berlin-Charlottenburg, 1936
- [8] Pfleiderer, E.: Neue Erkenntnisse über den Schneidvorgang an Stahl. Zeitschrift für Schweißtechnik (Zürich) 38, Heft 8, S. 151-161, Heft 9, S. 182-191, 1948
- [9] v. Hofe, H., H. Wirtz u. H.-P. Hartwigsen: Neue Erkenntnisse zum Ablauf des Brennschneidvorganges. Mitteilungen der BEFA 18, Nr. 8, S. 1-7, 1967

- [10] Gruchow, A.: Beitrag zum automatisierten Einsatz thermischer Trennverfahren in der Offshore-Industrie. Dissertation U Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 308, 1993
- [11] Krause, H.-J., H. Preß u. B. Steigleider: Meßverfahren und Meßeinrichtung zum Beurteilen des dynamischen Verhaltens von Brennschneidmaschinen. Mitteilungen der BEFA 29, Nr. 4, 1978
- [12] Matsuyama, K. u. M. Ogita: A Study of Formation Mechanism of Cut Surface Roughness in Flame Cutting. DVS-Berichte Band 185, S. 12-15, 1997
- [13] Teske, K.: Über die Thermodynamik und Thermochemie des Brennschneidens. Dissertation TU Berlin-Charlottenburg, 1955
- [14] Boschnakow, I.: Schutzgasbrennschneiden bis 3200 mm Stahldicke. Schweißtechnik 25, Heft 6, S. 254-257, 1975
- [15] Boschnakow, I.: Brennschneiden - Neue Erkenntnisse und Technologien. Technisch-wissenschaftliche Abhandlungen des ZIS-Halle, Nr. 106, 1974
- [16] Schönherr, W.: Beitrag zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Werkstück. Dissertation TH Karlsruhe, 1965
- [17] Mair, H.: Einfluß der Sauerstoffreinheit auf die Schneidgeschwindigkeit sowie Einflüsse der Schneidgeschwindigkeit auf die Schlackenzusammensetzung und die Schlackenhaftung beim autogenen Brennschneiden, DVS-Berichte Band 74, S. 21-28, 1982
- [18] Irmer, W.: Zum Einfluß des thermischen Trennprozesses auf die Werkstoffveränderungen an der Schnittkante. Dissertation TH Otto von Guericke Magdeburg, 1985
- [19] Stützenberger, W.: Konvektiver Wärmeübergang von Brenngas-Sauerstoff- Flammen an gekühlte und sich erwärmende Metalloberflächen. Dissertation, U Bochum, Schweißtechnische Forschungsberichte DVS, Band 14, 1987
- [20] Matsuyama, A., T. Nakai u. I. Okamoto: Interaction between Supersonic Jet and Burning Iron Wall in Oxygen Gas Cutting - Part I. Transactions of JWRI of Osaka University, Band 14, Nr. 1, S. 45-54, 1985
- [21] Matsuyama, A., T. Nakai u. I. Okamoto: Interaction between Supersonic Jet and Burning Iron Wall in Oxygen Gas Cutting - Part II. Transactions of JWRI of Osaka University, Band 15, Nr. 1, S. 33-40, 1986
- [22] Franke, J.W.: Modellierung und Optimierung des Laserstrahlbrennschneidens niedriglegierter Stähle. Dissertation RWTH Aachen, DVS-Berichte Band 161, 1994
- [23] Kawai, Y. u. Y. Shiraishi: Handbook of Physico-Chemical Properties at High Temperatures. The Iron and Steel Institute of Japan, 1988
- [24] Heidenreich, B.: Beitrag zum Laserstrahlbrennschneiden großer Stahlbleche. Dissertation BIAS Bremen, Strahltechnik-Bremen, Band 2, 1995
- [25] Danzer, W.: Neue Erkenntnisse zum Ablauf der Schneidprozesse Laser, Plasma und Autogen, dargestellt anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. DVS- Berichte Band 185, S. 5-8, 1997
- [26] Versemann, R.: Beitrag zum automatisierten autogenen Brennschneiden unter Wasser. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 513, 1999
- [27] Boschnakow, I.: Thermisches Trennen - Eine Studie zur Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit. ZIS-Halle Nr. 84, 1972
- [28] Grohmann, P.: High speed flame cutting process. Welding in the World, Band 37, Heft 6, S. 277-282, 1996
- [29] Boschnakow, I. u. H.-J. Löffler: Welche Bedeutung kommt der Sauerstoffvorhangdüse zu. ZIS-Mitteilungen, Heft 15, S. 1618-1627, 1971
- [30] Perleberg, J.-H., Fr.-W. Bach, H. Haferkamp u. R. Versemann: Brennschneiden mit Hochdruckdüsen zum Konturschneiden und für die Schweißnahtvorbereitung. DVS-Berichte Band 209, S. 296-300, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [31] Hodgkinson, R. u. L. Nickenig: Wirtschaftlich thermisch Trennen. International Conference on Cutting technology 2002, Kontec, Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, S. 20-24, 2002
- [32] Halbauer, K., R. Henrici u. J. Münzel: Qualitätssicherung beim thermischen Schneiden - Sensorik zur Flammen- und Schnittüberwachung, elektronische Diagnose- und Meldesysteme. DVS-Berichte Band 123, S. 24-28, 1989
- [33] Welzel, G.: Unmanned Cutting realized with a Novel Torch System. Welding in the World 35, Nr. 6, S. 366-368, 1995
- [34] Produktbeschreibung ALFA, Der Maschinenbrenner der Zukunft, Messer Cutting Systems,
- [35] Pfeuffer, A.: Brennschneiden in Hüttenwerken, Schweißen und Schneiden 27, Heft 12, S. 496-499, 1975
- [36] Rickfält, C. u. G. Broden: Oxy-Fuel Cutting of Thick Plates. Welding in the World, Vol. 35, Nr. 4, S. 238-242, 1995
- [37] Jansen, H.: Brennschneiden unter Wasser. Schweißen und Schneiden 14, Heft 8, S. 345-350, 1962
- [38] Straßburger, E.: Schweißen und Schneiden unter Wasser. Schweißtechnik Berlin 2, Nr.7, S. 206-212, 1952

- [39] Stalker, A.W.: From Oxy-Fuel to the Shaped Charge - and beyond. Welding and Metal Fabrication, Nr. 6, S. 303-311, 1980
- [40] Schafstall, H.G. u. R. Schaefer: Schneiden unter Wasser - Entwicklungsaktivitäten für die Meerestechnik. Schweißen und Schneiden 31, Heft 12, S. 512-524, 1979
- [41] Goldberg, F.: Survey of Underwater Cutting of Metals, Welding in the World 16, Nr. 9/10, S. 178-195, 1978
- [42] Töpper, H.: Brenner zum autogenen Schneiden unter Wasser - Deutsche Patentschrift 530465, 31.7.1929
- [43] Stalker, A.W.: A Survey of Underwater Cutting Techniques. Metal Construction, Nr. 6, S. 109-125, 1976
- [44] Hamasaki, M. u. Y. Murao: Underwater Gas Cutting (First Report). Trans. Japan Welding Society 9, Nr. 2, S. 17-22, 1978
- [45] Sumitomo, T., Y. Ogawa, J. Sakakibara u. Y. Tanaka: Mechanized Underwater Gas Cutting of Heavy-Thick Carbon Steel Structures. Proc. of 8th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, The Hague, Vol. I, S. 233-240, 1989
- [46] Yamashita, Y., Sasaki, T. u. Y. Ogawa: Mechanized Underwater Cutting for Dismantling of Mega-Float. International Conference on Cutting technology 2002, Kontec, Gesellschaft für technische Kommunikation mbH, S. 35-39, 2002
- [47] Bach, Fr.-W.; Versemann R. u. P. Wilk: Status and Development of Decontamination and Dismantling Techniques for Decommissioning of Nuclear Installations, Conference Proceedings: IAEA-Conference, 14. - 18. Oktober 2002, 2002
- [48] Steiner, H., Priesmeyer, U. u. M.-K. Steifensand: Practical Experience in Decommissioning KRB A Plant, Gundremmingen, Germany. 07.-11.08. 2005, ANS Topical Meeting on Decommissioning, Decontamination, & Re-utilization, Denver, USA, 2005