

Automatisierte Seilsägetechnologie für Unterwasserdemontage (ASTU)

Dipl.-Ing. Daniel Knecht¹, Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes¹, Dr. sc. techn. Martin Gödickemeier²

¹) Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

²) Hilti Corporation

1 Einleitung

Momentan existiert kein zufriedenstellender wissenschaftlicher Kenntnisstand der Seilsägetechnologie für den Einsatz unter Wasser. Werden Seilsägen eingesetzt, so werden die notwendigen und optimalen Einsatzparameter durch vorangestellte Testversuche, meist basierend auf dem empirischen Kenntnisstand des Operators, ermittelt. Solche Vorversuche bedeuten einen hohen Zeitaufwand und zusätzliche Kosten. Es gibt derzeit kein wissenschaftliches Modell für die Seilsägetechnologie und deshalb auch keine verlässlich einstellbaren Parameter, die einen optimalen Sägeprozess unter Wasser gewährleisten. Im Rahmen des wissenschaftlichen Forschungsprojektes werden erst die Grundlagen für automatisierte Seilsägearbeiten unter Wasser untersucht, um auf dieser Basis ein Modell der Seilsägetechnologie zu entwickeln.

Das auf drei Jahre ausgelegte Projekt wird am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), innerhalb der Professur „Technologie und Management des Rückbaus kerntechnischer Anlagen“ am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb bearbeitet.

Das Forschungsprojekt „Automatisierte Seilsägetechnologie für Unterwasserdemontage“ (ASTU), mit der Kennziffer 02S8608, wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

2 Ziele des Forschungsprojektes

Nach Aufbau eines Versuchstandes mit integrierter Messsensorik werden unter Parametervariation Grundlagenversuche durchgeführt. Darauf folgende spezielle Leistungsuntersuchungen geben Aufschluss über Schneidverhalten und Standzeiten des Seiles bei verschiedenen Materialien. Aus den ermittelten Daten wird ein Modell erstellt, das eine Vorhersage der optimalen Schnittparameter für Seilsägearbeiten, in Abhängigkeit von Geometrie und Material des Schnittgutes ermöglicht. Damit ist eine genaue Aussage über die Schneidzeit möglich, was die Planungssicherheit und damit die Wirtschaftlichkeit steigert.

Ebenfalls sind Strömungsuntersuchungen innerhalb der Seilsägeföhrung und der Schnittflächen sowie in deren Umgebung vorgesehen, um Optimierungen vornehmen zu können. Ferner werden korrosionsverursachende Einschlüsse in den Schnittflächen und der Umgebung sowie die Freisetzung von Aerosolen untersucht.

Als Weiterentwicklung ist die Konstruktion einer Tauchseilsäge vorgesehen. Somit muss das zu trennende Material nicht mehr aufwändig mit dem Seil umschlungen werden. Über eine nach unten verfahrbaren Föhrungseinrichtung soll das Seil von oben in den Schnittbereich „eingetaucht“ werden.

3 Prüfstand

Zu Beginn des Projektes wurde ein Versuchsstand samt Messverfahren und Sensorik konzipiert, dimensioniert und gebaut. Als Basis dient eine Seilsäge des Typs DS-WS 15 der Firma Hilti Corporation. Für eine bessere Sicht auf den Sägeprozess wurde ein Wasserbecken aus transparentem Plexiglas angefertigt. Ebenfalls wurde eine leicht zu entfernende Wechsellvorrichtung für die Probe konstruiert (siehe Abb. 2). An dieser wird das Diamantseil mittels Umlenkrollen zu der dort fixierten Probe geföhrt. Es werden Seile mit galvanisch aufgetragenen Diamanten verwendet. Folgende Parameter werden während den Schneidversuchen aufgenommen:

- Schnittgeschwindigkeit des Seils
- Vorschub des Seils
- Antriebsleistung
- Wassertemperatur
- Fahrweg der Pneumatikzylinder
- Spangrößenverteilung



Abbildung 1: Versuchstand

4 Versuchsanordnung und Programm

Nach Aufbau des Versuchstandes wurden mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen Geometrien für die Materialien Stahl (S235JR) und Edelstahl (1.4301) durchgeführt. Diese geben Aufschluss über das Schneidverhalten und die Standzeiten der Seile. Es wurde das „umschlingende Verfahren“ als Anordnung ausgewählt, da dieses in der Praxis vorrangig angewendet wird.

Die einzelnen Versuchsreihen werden jeweils mit einem neuen Seil geschnitten. Somit sind diese vergleichbar und die Ergebnisse interpretierbar.

Als Geometrievarianten werden hochkant und quer liegende rechteckige, sowie runde Querschnitte untersucht. Eine Versuchsreihe besteht aus zehn Querschnittsproben, die jeweils eine zu schneidende Fläche von 20.000 mm² besitzen. Die rechteckigen Probekörper verfügen über einen Querschnitt von 200 mm auf 100 mm. Die runden Proben haben einen Durchmesser von 160 mm und besitzen dadurch näherungsweise den gleichen Flächeninhalt.

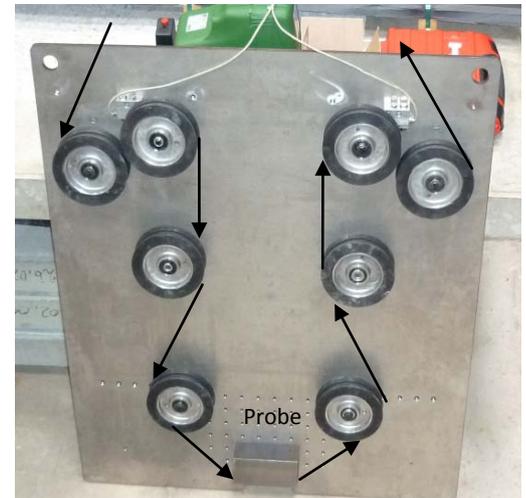


Abbildung 2: Wechsellösungsvorrichtung mit Versuchsanordnung und Seilverlauf

5 Erste Versuchsergebnisse

Bis dato wurden fünf Versuchsreihen bestehend aus runden und quer bzw. hochkant liegenden rechteckigen Proben abgeschlossen. Es zeigt sich, dass die Proben aus rundem Stahl zu Beginn der Versuchsreihe eine höhere Trennzeit aufweisen als quer liegende, rechteckige Proben, jedoch ist der Verschleiß am Seil im weiteren Verlauf erheblich geringer (siehe Abb. 4). Die besten Ergebnisse wurden mit rundem Stahl (S235JR) erzielt, ebenfalls sehr gute Resultate lieferte der rechteckige, quer liegende Stahl. Im Gegensatz dazu waren die hochkant liegenden Versuchskörper, nur unter hohem Verschleiß und damit steigender Sägezeit zu trennen. Da lediglich die Geometrie geändert wurde, ist die auftretende Differenz auf die Eingriffslänge zurückzuführen. Folglich steigt bei kürzerer Eingriffslänge, der Verschleiß am Diamantseil. Da die Vorschubkraft konstant gehalten wird, erfahren die Diamantsegmente vor allem zu Beginn des Schnittes, bei der sich nur eine kurze Seillänge im Eingriff befindet, mehr Druck. Bei einer längeren Eingriffslänge verteilt sich die Kraft auf mehrere Diamantsegmente und dadurch sinkt der spezifische Druck, der auf ein Segment wirkt. Dies lässt sich leicht nach der Formel $F = p \cdot A$ darstellen. Bleibt die Kraft (F) konstant und verringert sich die Fläche (A), muss zwangsläufig der Druck (p) ansteigen.



Abbildung 3: Geschnittene Stahlprobe

Die mittlere Eingriffslänge, bei den rechteckig, hochkant liegenden Proben, entspricht annähernd der Hälfte einer quer liegenden Probe. Die resultierende Trennzeit verdoppelt sich jedoch nicht, sondern steigt fast exponentiell an. (siehe Abb. 4) Eine weitere Einflussgröße auf die Trennzeit stellt der, sich über die Zeit verändernde, Einfallswinkel des Seiles zur Probe, bedingt durch die Geometrie, dar. Je größer der Einfallswinkel des Seiles, desto größer ist die Normalkraft auf die Probe. Da die runde Probe in der gewählten Versuchsanordnung ähnliche Winkel wie die hochkant aufgestellte, rechteckige Probe besitzt, kann der Einfluss des Einfallswinkels hier vernachlässigt werden.

Edelstahl hat sich im Vergleich zum Stahl als besonders schwer zu trennen herausgestellt. Schon nach zwei bzw. drei Proben konnte das Seil nicht mehr weiter verwendet werden. Dies ist auf die hohe Kaltverfestigungsneigung, die niedrige Wärmeleitfähigkeit und die Zähigkeit des Werkstoffs Edelstahl zurückzuführen. Die Diamantzwischenräume setzten sich aufgrund der hohen Duktilität mit Span zu, so verringerte sich die Abtragstiefe und der Verschleiß der Diamanten stieg an. Ein Einfluss der Probengeometrie auf die Schneidzeit konnte aufgrund der geringen Versuchsanzahl je Reihe nicht erkannt werden. Während der Versuche mit runden Edelstahlproben wurde ein einseitiges Abschleifen des Seiles beobachtet. Eine Verdrillung in sich um 180° zeigte keine Verbesserung.

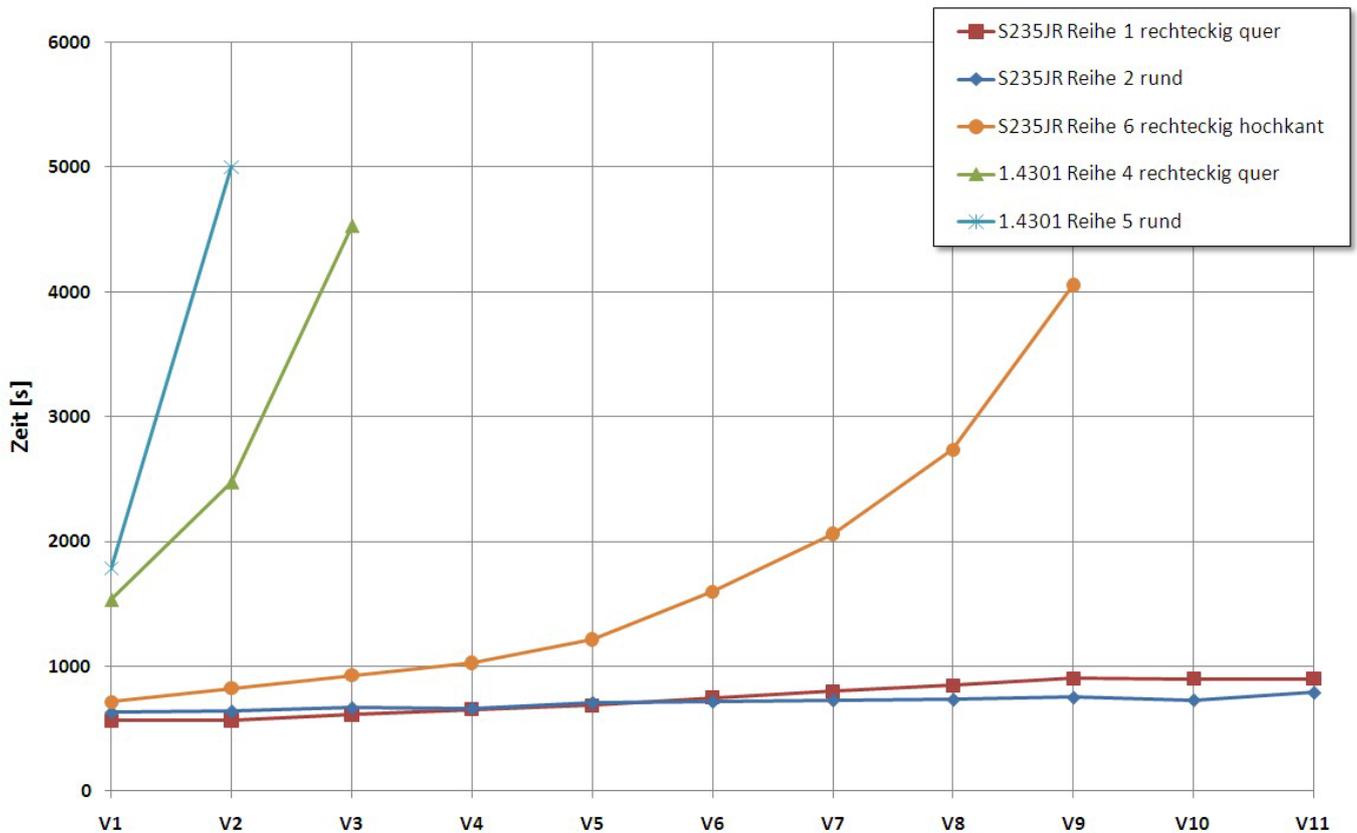


Abbildung 4: Versuchsreihen mit unterschiedlichem Material und Geometrie im Vergleich

6 Kraftverteilung

Anhand eines Biegebalkens, der an einer Umlenkrolle befestigt ist, wurde die auf das Seil aufgebrachte Kraft am Ein- und Austritt der Probe ermittelt. In Abbildung 5 sind diese Kräfte am Beispiel einer quer liegenden rechteckigen Stahlprobe über die Trennzeit dargestellt. Vorschubdruck und Seilgeschwindigkeit wurden in diesem Versuch konstant gehalten. Während zu Beginn des Schnittes die Zugkraft auf der Ausgangsseite annähernd konstant bei etwa 50 N liegt, beträgt die Kraft auf der Eingangsseite weniger als ein Drittel. Aufgrund des bogenförmigen Verlaufs des Seiles in der Schnittfläche, der sich im Laufe der Zeit durch den Sägeprozess einstellt, und dem geringer werdenden Einfallswinkel, steigt die Kraft auf der Eingangsseite von 12 N auf 20 N. Nachdem die Probe durchtrennt wurde, gleichen sich beide Werte wieder an den „Ruhezustand“ von 40 N an. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Kraft, gegenüber dem Ruhezustand, auf der Ausgangsseite erhöht, während sie sich auf der Eingangsseite verringert.

Die Differenz gegenüber dem Ruhezustand lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$(F_{\text{Ausgang}}(t) - F_{\text{Ruhe}}) + (F_{\text{Eingang}}(t) - F_{\text{Ruhe}}) = \Delta F(t) \quad (1a)$$

$$(F_{\text{Ausgang}}(t) + F_{\text{Eingang}}(t)) - 2 * F_{\text{Ruhe}} = \Delta F(t) \quad (1b)$$

$t_{\text{Anfang}} = 0$ eingesetzt in (1b) ergibt:

$$(50 \text{ N} + 12 \text{ N}) - 2 * 40 \text{ N} = -18 \text{ N}$$

$$\underline{\underline{\Delta F(0) = -18 \text{ N}}}$$

$t_{\text{Ende}} = 23$ eingesetzt in (1b) ergibt:

$$(50 \text{ N} + 20 \text{ N}) - 2 * 40 \text{ N} = -10 \text{ N}$$

$$\underline{\Delta F(23) = -10 \text{ N}}$$

Wird die Differenz der Kraft die auf Ein- und Ausgangsseite wirkt, unter Abzug des Ruhedruckes gebildet, erhält man für den Zeitpunkt $t_{\text{Anfang}} = 0$ eine Kraftdifferenz von -18 N. Das heißt, dass der reale gegenüber dem eingestellten Vorschubdruck im Mittel abnimmt. Dieser steigt im Laufe des Sägeprozesses jedoch wieder an, so dass zum Zeitpunkt $t_{\text{Ende}} = 23$ nur noch eine Kraftdifferenz von -10 N vorherrscht.

Somit ist bewiesen, dass nicht zwangsläufig immer der gleiche Druck an der Probe anliegt, sondern dass sich dieser während des Trennprozesses und lokal über der Probengeometrie ändert.

Um genauere Aussagen über die örtliche Kraftaufteilung in der Probe treffen zu können, wird eine weitere Versuchsanordnung entwickelt. Die Probe wird in mehrere kleinere Einzelteilstücke mit jeweils eigenem Kraftsensor unterteilt sein.

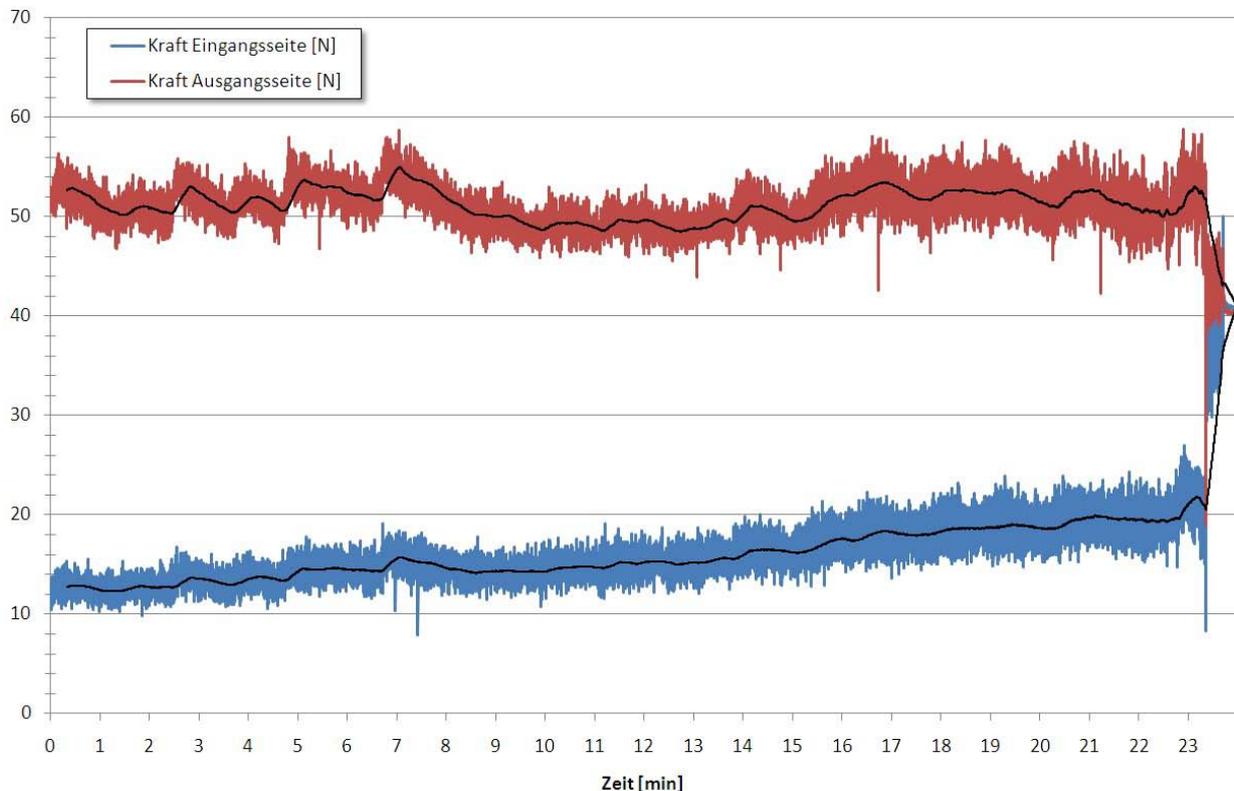


Abbildung 5: Kraft [N] von Ein- und Ausgangsseite dargestellt über der Trennzeit [min].

7 Ausblick

Um eine größere Datenbasis zu erhalten, werden weitere Versuchsreihen durchgeführt. Der Fokus liegt hier vor allem auf, aus Grundelementen (Rechteck und Kreis), zusammengesetzten Geometrien. In diesem Zuge wird auch der Kanteneinfluss näher betrachtet. So soll ermittelt werden wie hoch der Verschleiß in Abhängigkeit von der Eingriffslänge ist.

Ziel des Projektes ist es aus den ermittelten Daten ein Modell zu erstellen, das eine eindeutige Vorhersage der optimalen Schnittparameter in Abhängigkeit des Material und der Geometrie ermöglicht. Dadurch werden genaue Aussagen über die Schneidzeit möglich, was eine Erhöhung der Planungssicherheit zur Folge hat.