

Dennis Jünemann, Hans-Heinrich Harms und Thorsten Lang

# Wasseraufbereitung beim Hochdruckwasserstrahlschneiden von Zuckerrüben

Zur mobilen Anwendung des Hochdruckwasserstrahlschneidens landwirtschaftlicher Güter ist es notwendig, eine ausreichende Wassermenge für den Schnittprozess mitzuführen. Dies erfordert zusätzlichen Bauraum und erhöht das Gewicht einer mobilen Maschine in nicht unerheblichem Umfang. Am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig wird daher die Möglichkeit untersucht, den Frischwasserbedarf des Verfahrens durch die Wiederaufbereitung des Prozesswassers zu reduzieren. Die bisherigen Ergebnisse des von der DFG geförderten Projektes zeigen, dass dies grundsätzlich möglich ist und dass hierzu mehrere Verfahrensschritte erforderlich sind.

## Schlüsselwörter

Alternative Schneidverfahren, Wasseraufbereitung, Wasserstrahlschneiden, Zuckerrübe

## Keywords

Alternative cutting technologies, water processing, water jet cutting, sugar beet

## Abstract

Jünemann, Dennis; Harms, Hans-Heinrich and Lang, Thorsten

Water processing for high pressure water jet cutting of sugar beets

Landtechnik 66 (2011), no. 2, pp. 103-107, 3 figures, 2 references

For mobile application of high pressure water jet cutting of agricultural goods it is necessary to carry the sufficient water amount for the cutting process. This requires additional place and increases the machine weight. Due to this the feasibility to reduce the required amount of fresh water by recycling the cutting water is examined at the Institute of Agricultural Machinery and Fluid Power, Technical University Braunschweig. This project is supported by the German Research Foundation (DFG). Present results show that this is generally possible and several process steps are necessary.

■ Im ersten Abschnitt des Forschungsprojektes war die Strahlausbreitung und der Strahlaufprall beim Wasserstrahlschneiden von Zuckerrüben untersucht worden. Diese Untersuchungen hatten gezeigt, dass nahezu das gesamte verunreinigte Prozesswasser in Abhängigkeit von Schneiddruck, Schnittgeschwindigkeit und Schnitttiefe in einem relativ kompakten Bereich aufgefangen werden kann [1]. Ziel des im Folgenden beschriebenen zweiten Projektabschnitts war es, eine Aufbereitungsmöglichkeit des Prozesswassers zu finden, mit der die Anforderungen der Pumpenhersteller an die Wasserqualität erreicht werden können.

## Verunreinigtes Prozesswasser

Das verunreinigte Prozesswasser des Schnittvorgangs enthält einen Trockenmasseanteil von 10–55 % und wird im Folgenden als Rübenschlamm bezeichnet. Zur Gewinnung des Rübenschlammes wurde ein Standardversuch definiert. Dabei wurden die Schnittgeschwindigkeit auf 1,5 m/s, der Schneiddruck auf 150 MPa und der Düsendurchmesser auf 0,6 mm festgelegt. Mit diesen Parametern kann bei Zuckerrüben eine Schnitttiefe von deutlich über 100 mm erzielt werden. Im praktischen Einsatz des Verfahrens wurde zusätzlich nicht verschmutztes Wasser aufgefangen, wenn die Schneiddüse den Abstand zwischen den Rübenpflanzen in einer Reihe überwindet und kein Schnittvorgang stattfand. Der Rübenschlamm wurde daher für die nachfolgenden Versuche zur Aufbereitung so verdünnt, dass der Schlamm zu jeweils 50 Volumenprozent aus Frischwasser und aus Rübenschlamm bestand.

Zur ersten Untersuchung des Ausgangsmaterials, das z. T. grobe Verunreinigungen enthielt, wurde zunächst eine optische Fotoanalyse durchgeführt. Bei dieser Analyse wurde eine Par-

tikelerkennung des Ausgangsmaterials mittels Kantenerkennung der Teilchen durchgeführt. Die Bildanalyse ermöglichte es, Partikel ab einer Größe von etwa  $300\ \mu\text{m}$  zu erkennen. Im Bereich unter  $1\ \text{mm}$  Partikelgröße konnte ein deutlicher Anstieg der Partikelzahl festgestellt werden. Die größten Partikel im Rübenschlamm lagen im Bereich von etwa  $5\ \text{mm}$ . Die weiteren Analysen der Partikelgrößenverteilungen wurden mit einem Laserbeugungssensor durchgeführt. Er konnte Partikel bis zu einer Größe von maximal  $875\ \mu\text{m}$  erkennen. Der Laserbeugungssensor konnte daher nur für vorgereinigte Flüssigkeiten eingesetzt werden.

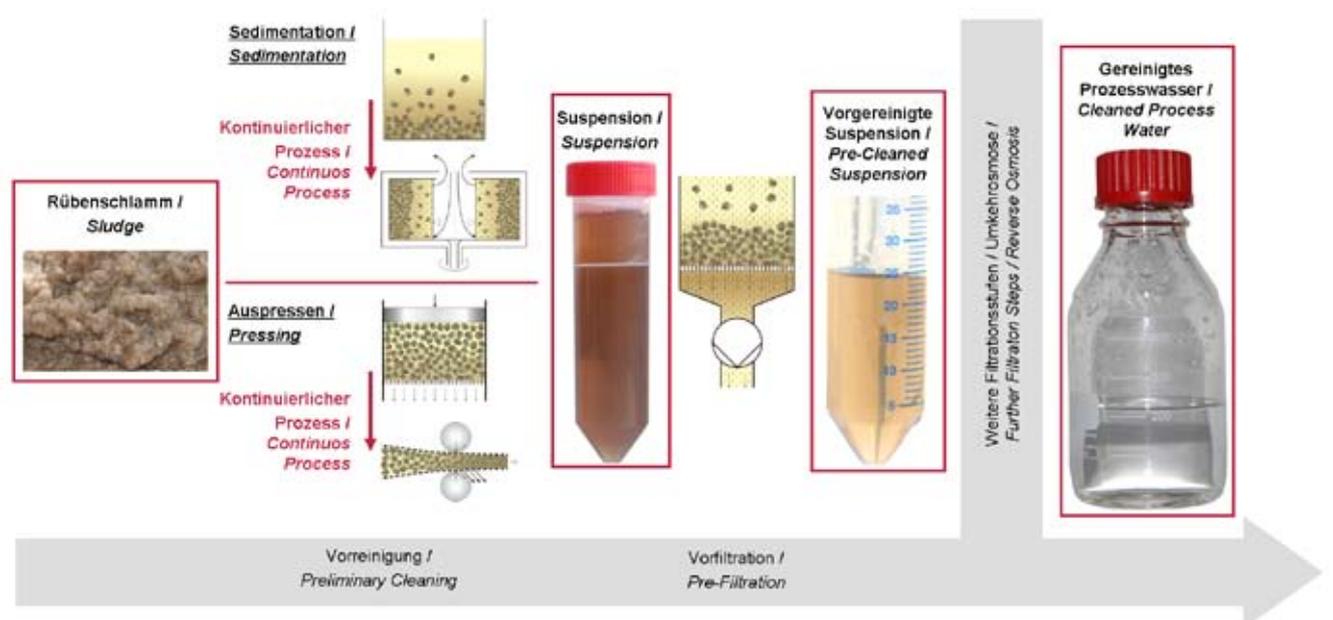
### Vorreinigung

Zur Rückgewinnung des Schneidwassers ist es zunächst erforderlich, eine Fest-Flüssig-Trennung des Rübenschlammes durchzuführen. Nach Stieß [2] zählen zu den Prinzipien der Fest-Flüssig-Trennung die Sedimentation, die Filtration und das Auspressen. Im Ausgangsmaterial ist insgesamt ein hoher Festkörperanteil festzustellen. Dieser würde bei einer ausschließlichen Verwendung von Filterelementen sehr schnell zur Verblockung der Filter führen. Daher ist für die Aufbereitung ein mehrstufiges Verfahren erforderlich (**Abbildung 1**). Im ersten Verfahrensschritt muss zunächst eine Fest-Flüssig-Trennung mittels Sedimentation oder Auspressen durchgeführt und aus dem Rübenschlamm die Flüssigkeit extrahiert werden. Für den mobilen Einsatz bieten sich Zentrifugationsverfahren, die zum Prinzip der Sedimentation zählen, oder Pressverfahren an. Für beide Verfahren gibt es Möglichkeiten, einen kontinuierlichen Fluss der Massenströme zu erreichen.

Zur Vorreinigung des Ausgangsmaterials wurden zunächst Versuche mit einer Laborzentrifuge durchgeführt. Die während der Zentrifugierung wirkenden Fliehkräfte haben in der Probenröhre zu einer Trennung des Rübenschlammes in drei Schichten geführt. Unten befand sich eine Schicht aus Rübenschlamm. Im mittleren Bereich stellte sich eine trübe Suspension mit kleineren Schwebeteilchen ein. Darüber konnte eine Schwimmschicht beobachtet werden. Nach der Zentrifugierung ist die maximale Partikelgröße in der Suspension kleiner als  $1\ \text{mm}$ . Dadurch können aus dem unverdünnten Rübenschlamm etwa 50% Suspension gewonnen werden.

Als weiteres Verfahren zur Vorreinigung wurde ein Pressverfahren angewandt. Hierbei war es möglich, den Reinigungseffekt zu beeinflussen. Die Partikelgrößenverteilung in der Flüssigkeit hängt generell vom Pressverfahren und den dabei verwendeten Filtern oder Sieben ab. Der Gewinnungsgrad der Suspension aus dem Rübenschlamm wurde in einer Presse mit verdünntem Rübenschlamm (50% Frischwasseranteil) ermittelt. Bei der Verwendung von qualitativem Filterpapier mit einem mittleren Rückhaltevermögen von  $7\text{--}12\ \mu\text{m}$  konnten etwa 80% des Rübenschlammes als Suspension abgetrennt werden. Für den unverdünnten Rübenschlamm wurde aus diesem Ergebnis ein Gewinnungsgrad von 55–60% abgeschätzt, der damit leicht über dem der Zentrifugierung liegen würde. Bei einem höherem Pressdruck ist ein geringfügig höherer Gewinnungsgrad zu erwarten. Begrenzend wirkt aber unter anderem die Haltbarkeit des Filterpapiers.

Abb. 1



Prozessschritte der Fest-Flüssig-Trennung des Rübenschlammes

Fig. 1: Process steps for separation of solid and aqueous phases of beet sludge

## Filtration

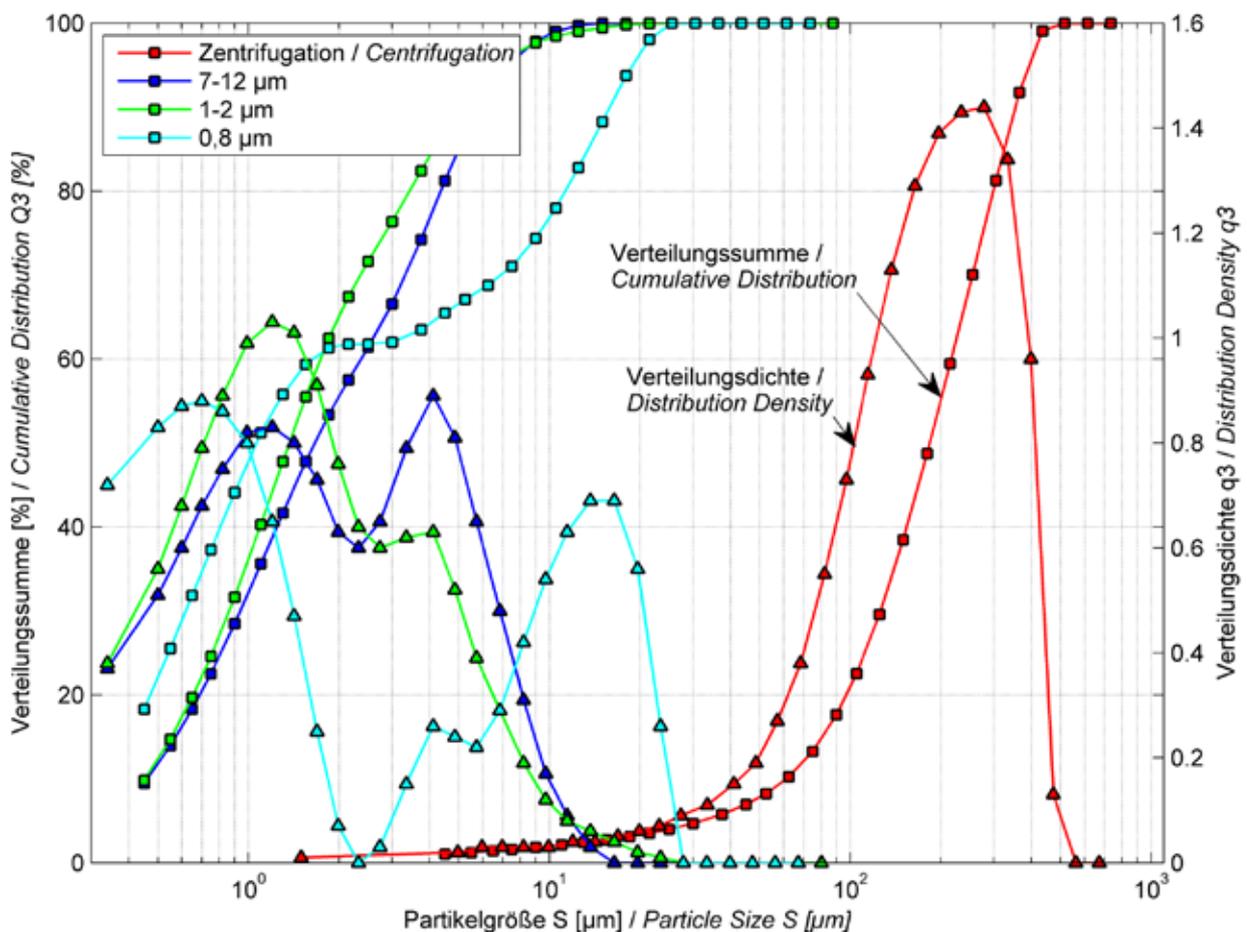
Als nächste Reinigungsstufe wurde die Verwendung verschiedener qualitativer Filterpapiere und quantitativer Membranfilter mit definierter Porengröße untersucht. Die filtrierten Proben wurden mithilfe eines Laserbeugungssensors und eines Mikroskops analysiert. Bei einigen Proben wurden die Inhaltsstoffe bestimmt, die von den Pumpenherstellern zur Beurteilung der Wasserqualität herangezogen werden. Da die Versuche im Labormaßstab durchgeführt und Filter mit einer kleinen Fläche verwendet wurden, waren bei den feinen Filtern ein oder zwei Vorfiltrationsstufen notwendig, um ihrer Verblockung entgegenzuwirken, die z. T. schnell eintrat.

**Abbildung 2** zeigt die Partikelgrößenverteilung verschiedener Proben nach der Filtration und zum Vergleich die einer zentrifugierten Probe. Die Partikelgrößenverteilungen wurden mit einem Laserbeugungssensor gemessen. Das Diagramm zeigt je Probe den Verlauf zweier Graphen, die über der Partikelgröße aufgetragen sind. Ein Graph steht für die Verteilungssumme und gibt an, welcher prozentuale Anteil der Partikel kleiner ist als der dazugehörige Wert auf der x-Achse. Der zweite Graph repräsentiert die Verteilungsdichte und korrespondiert mit der

Steigung des ersten Graphen. Nach der Zentrifugierung lag die maximale Partikelgröße unterhalb von  $735 \mu\text{m}$ , nach der Vorfiltration unterhalb von  $15 \mu\text{m}$ . Der Verlauf der Verteilungsdichte der Zentrifugierung zeigte ein deutlich ausgeprägtes Maximum, dessen Position bei den jeweiligen Versuchswiederholungen unterschiedlich war und in einem Bereich zwischen etwa  $100$  und  $400 \mu\text{m}$  wanderte. Die Vorfiltration zeigte zwei reproduzierbare Maxima zwischen  $1$  und  $1,5 \mu\text{m}$  und bei etwa  $4 \mu\text{m}$ .

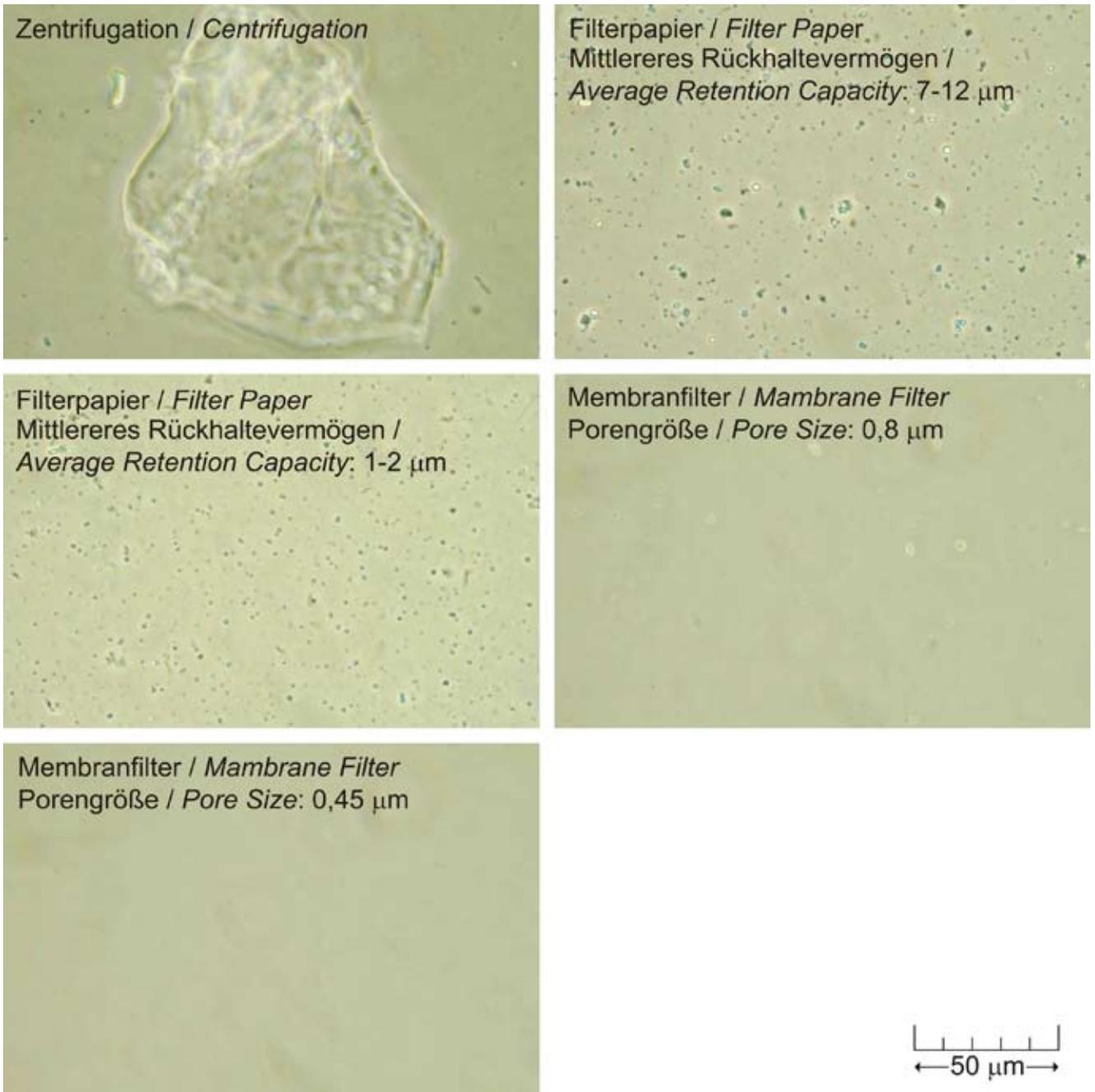
Die zur Vorfiltration und Zentrifugation gehörenden Graphen zeigten einen gleichmäßigen, eindeutigen Verlauf, wohingegen die Verläufe der Verteilungsdichte der feineren Filterstufen ( $1-2 \mu\text{m}$  und  $0,8 \mu\text{m}$ ) mehrere Maxima aufwiesen. Neben den zu erwartenden Peaks entsprechend der jeweiligen Filterfeinheit zwischen  $1-2 \mu\text{m}$  und unterhalb von  $0,8 \mu\text{m}$  waren weitere Maxima oberhalb der verwendeten Porengröße vorzufinden, die aufgrund der verwendeten Filter theoretisch nicht von Partikeln herrühren können. Dafür sind zwei Ursachen denkbar: Die erste Möglichkeit ist die Agglomeratbildung nach der Filtration. Gegen diese Annahme spricht, dass derartige Agglomerate und eine starke Neigung des Probenmaterials zur Agglomeration nicht nachgewiesen werden können und die

Abb. 2



Partikelgrößenverteilung  
Fig. 2: Particle size distribution

Abb. 3



Mikroskopische Aufnahmen verschiedener Proben. Foto: ILF  
 Fig. 3: Microscopical shots of different samples

Positionen der Maxima oberhalb der Porengröße der verwendeten Filter bei den jeweiligen Versuchswiederholungen nicht reproduzierbar waren.

Sehr wahrscheinlich hingegen ist die zweite Möglichkeit, dass das Messergebnis durch feine Luftbläschen beeinflusst wurde. Diese Luftbläschen sind z.T. in größerer Anzahl mit bloßem Auge sichtbar und lassen sich schwer entfernen, da die Probenflüssigkeit im Laserbeugungssensor permanent umgewälzt wird. Die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchung bestätigten die Annahme, dass keine Partikelgrößen in den je-

weiligen Proben enthalten waren, die der verwendeten Porengröße des Filters widersprechen.

**Abbildung 3** zeigt, ergänzend zur Partikelgrößenverteilung, mikroskopische Aufnahmen verschiedener Proben. Die angegebene Filterfeinheit entspricht jeweils dem letzten Filtrationsschritt. Deutlich erkennbar sind die Abnahme der maximalen Teilchengröße mit zunehmender Filterfeinheit und die Abnahme der Anzahl der im Mikroskop sichtbaren Partikel. Ab einer Porengröße von  $0,8 \mu\text{m}$  sind nur noch sehr wenige kleine Partikel sichtbar. Ab einer Porengröße von  $0,45 \mu\text{m}$  können

mit dem verwendeten Mikroskop keine Partikel mehr sichtbar gemacht werden. In der zentrifugierten Probe sind deutlich größere Partikel enthalten. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die Anzahl der mit dem Mikroskop sichtbaren Partikel deutlich geringer ist als in den filtrierten Proben. Die Zentrifugierung ist aus diesem Grund besonders gut für die Vorreinigung geeignet. Bei Anwendung der Zentrifugierung ist zu erwarten, dass sich die Standzeit der nachfolgenden Filterstufen verlängert und der Verblockungseffekt deutlich abnimmt.

Im Rahmen der Versuchsreihen zur Filtration wurden verschiedene Membranfilter bis zu einer Porengröße von 0,05 µm verwendet. Ab einer Porengröße von etwa 0,8 µm ließ die Trübung des Filtrats deutlich nach. Das Filtrat veränderte sich in eine klare, aber deutlich gelbliche Flüssigkeit mit abnehmender Färbung (**Abbildung 1**). Auch bei einer Porengröße von 0,05 µm war diese Verfärbung noch vorhanden. Die Analytik der Inhaltsstoffe spiegelte diese sichtbare Färbung wider. Insbesondere die Vorgaben der Pumpenhersteller, was die Menge gelöster Inhaltsstoffe und Leitfähigkeit der Flüssigkeit betrifft, werden bei der Verwendung eines Filters mit einer Porengröße von 0,1 µm noch nicht erfüllt. Ein Großteil der Menge der gelösten Stoffe entfällt auf Glucose, Fructose und Saccharose. Um sie aus dem Filtrat zu entfernen, ist ein weiterer Schritt notwendig. Hierzu wurden weitere Reinigungsversuche mit einer Umkehrosmose-Membran durchgeführt. Dabei gelang es, die Menge der gelösten Inhaltsstoffe annähernd in den vorgegebenen Bereich zu bringen und den Pumpenanforderungen zu entsprechen. Eine leichte Überschreitung der gelösten Stoffe, verursacht durch Saccharose, ist erkennbar. Es wird erwartet, dass diese Überschreitung bei Verwendung einer anderen Membran nicht mehr vorhanden ist. Eine Färbung des Prozesswassers war nach der Umkehrosmose nicht mehr sichtbar.

### Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen die Möglichkeit der mobilen Wasseraufbereitung, um den Frischwasserbedarf beim Hochdruckwasserstrahlschneiden zu verringern. Es sind mehrere Verfahren-

schritte zur Rückgewinnung des Schneidwassers erforderlich. Als Vorreinigung ist insbesondere die Zentrifugierung für die Feststoffabscheidung geeignet. Nach der Vorreinigung wird mehrstufig filtriert, um die von den Pumpenherstellern vorgegebene Partikelgröße von 1 bzw. 0,5 µm zu unterschreiten. Zur Entfernung der gelösten Inhaltsstoffe, insbesondere der Zucker, kann eine weitere Reinigung mithilfe der Umkehrosmose durchgeführt werden.

Da die Umkehrosmose unter anderem die Wasserhärte stark herabsetzt, ist zu klären, ob danach eine Konditionierung des Wassers erforderlich ist. Ebenso ist zu klären, ob durch die Verwendung mehrerer Filtrationsstufen und die Anwendung einer Querstromfiltration eine ausreichende Standzeit der Filter erreicht werden kann und ob eine Verunreinigung des Filtrats durch Mikroorganismen vorliegt.

### Literatur

- [1] Jünemann, D.; Harms, H.-H. (2010): Development of a Water Catcher for High Pressure Water Jet Cutting of Agricultural Goods. 17th World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering, Canadian Society for Bioengineering, 13.-17.06.2010, Québec City
- [2] Stieß, M. (1997): Mechanische Verfahrenstechnik 2. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 3. Aufl.

### Autoren

**Dipl.-Ing. Dennis Jünemann** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig (Betreuer: **Prof. i.R. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms**, kommissarischer Leiter: **Prof. Dr.-Ing. T. Lang**), Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig, E-Mail: d.juenemann@tu-braunschweig.de

### Danksagung

Das vorgestellte Projekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell gefördert.