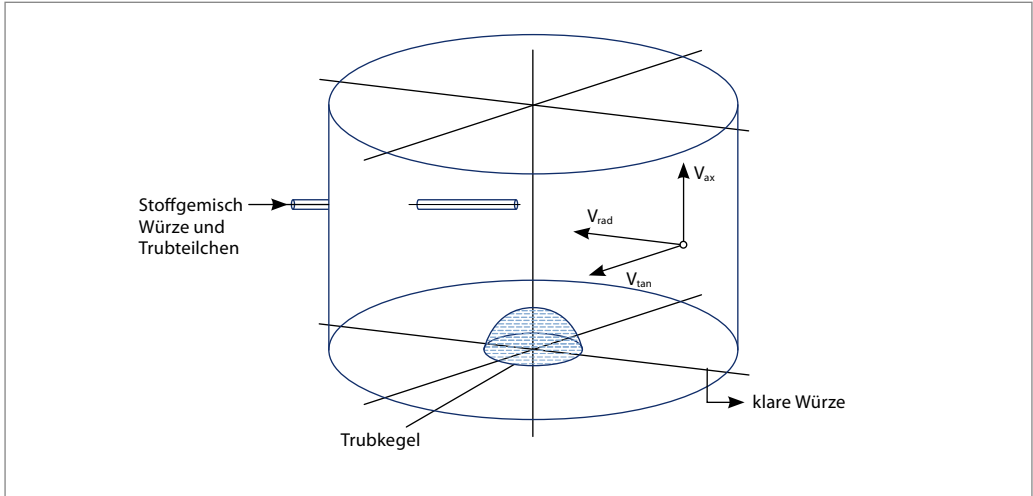


Abb. 27: Das Schema des Whirlpools mit den drei maßgebenden Geschwindigkeitskomponenten

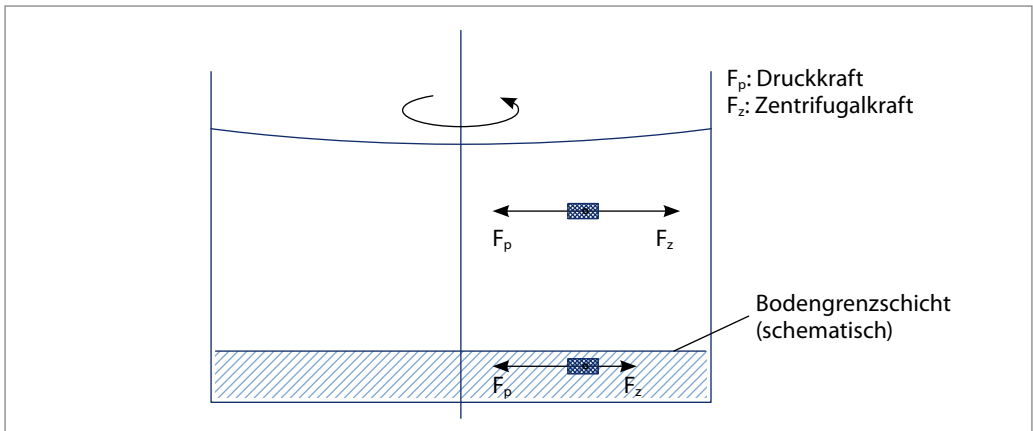


Der Inhalt des Whirlpooltanks wird dadurch in eine Rotationsbewegung versetzt (Primärströmung). Auf Grund des Kräftegleichgewichts an der freien Würzeoberfläche sinkt diese in der Mitte ab und es bildet sich der bekannte Rotationsparaboloid.

Nach dem Ende des Einlaufvorgangs und dem Abklingen aller damit verbundenen Strömungen stabilisiert sich die Rotationsströmung. Auf Grund der wirkenden Zentrifugalkräfte steigt der Druck in der Flüssigkeit von innen nach außen stetig an. Dieser Druckgradient wird der Bodenschicht ausgeprägt. Dadurch entsteht eine starke, spiralförmige Einwärtsströmung (Sekundärströmung) dicht über dem Behälterboden. Fast über den gesamten Behälterquerschnitt steigt nun die Würze wieder nach oben. Die große Querschnittsfläche bedingt eine geringe Aufstiegs geschwindigkeit der Würze im Vergleich zur Geschwindigkeit der Sekundärströmung.

Die Trennung des Heißtrubs von der Würze ist ein physikalischer Prozess, der sich in der sogenannten Bodengrenzschicht des Whirlpoolbehälters abspielt (Abbildung 28).

Abb. 28: Das Prinzip des Whirlpooleffektes

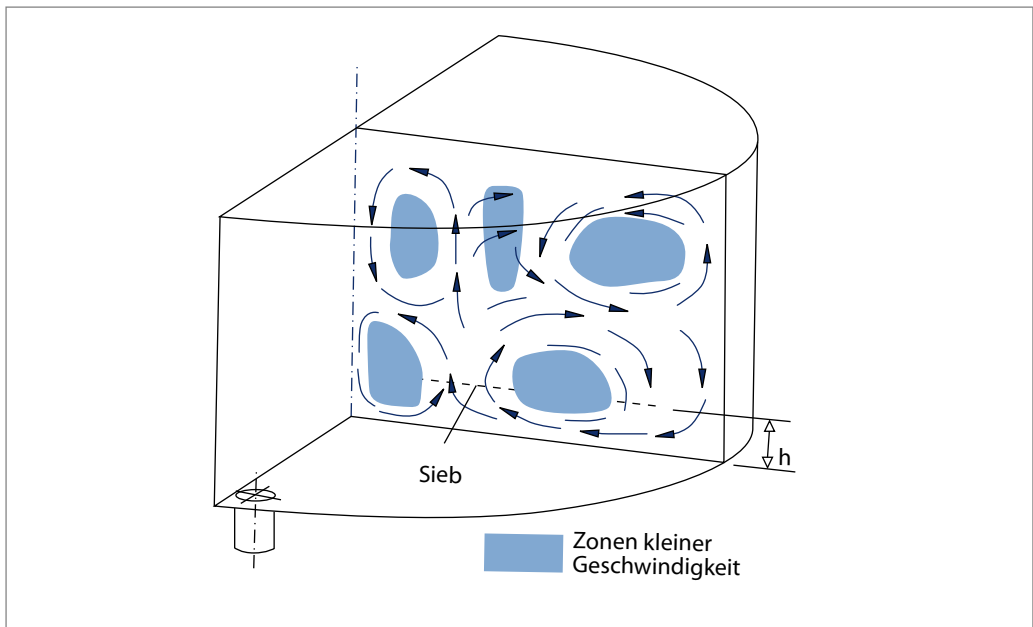


Dort ist das Gleichgewicht zwischen den Druck- und den Zentrifugalkräften, die durch die Rotation der Würze entstehen, gestört, so dass ein Sog in die Bodennähe des Whirlpools die ausgeflockten Heißtrubteilchen zum Zentrum dieses Bodens befördert. Diese Erscheinung ist auch als Teetasseneffekt bekannt. Im Whirlpool entstehen also verschiedene unerwünschte Sekundärströmungen, von denen die wichtigste der Toruswirbel darstellt.

6.4.4 UNERWÜNSCHTE SEKUNDÄRSTRÖMUNGEN IM WHIRLPOOL

Konzentrisch zur Whirlpoolachse liegt in Bodennähe ein sog. Toruswirbel, gleich einem Autoreifen, der nicht nur ein zähes Leben besitzt, sondern in unerwünschter Weise den sich absetzenden Trub wieder aufzuwirbeln versucht. Die Stärke dieses Wirbels ist abhängig von der Eintrittsgeschwindigkeit v_e . Durch die im Laufe der Whirlpoolentwicklung erfolgte erhebliche Begrenzung von v_e wurde der Einfluss des Toruswirbels also gleichfalls stark abgemildert.

Abb. 29: Toruswirbel sowie Planet- und Taylor-Wirbel als Quellen störender Sekundärströmungen



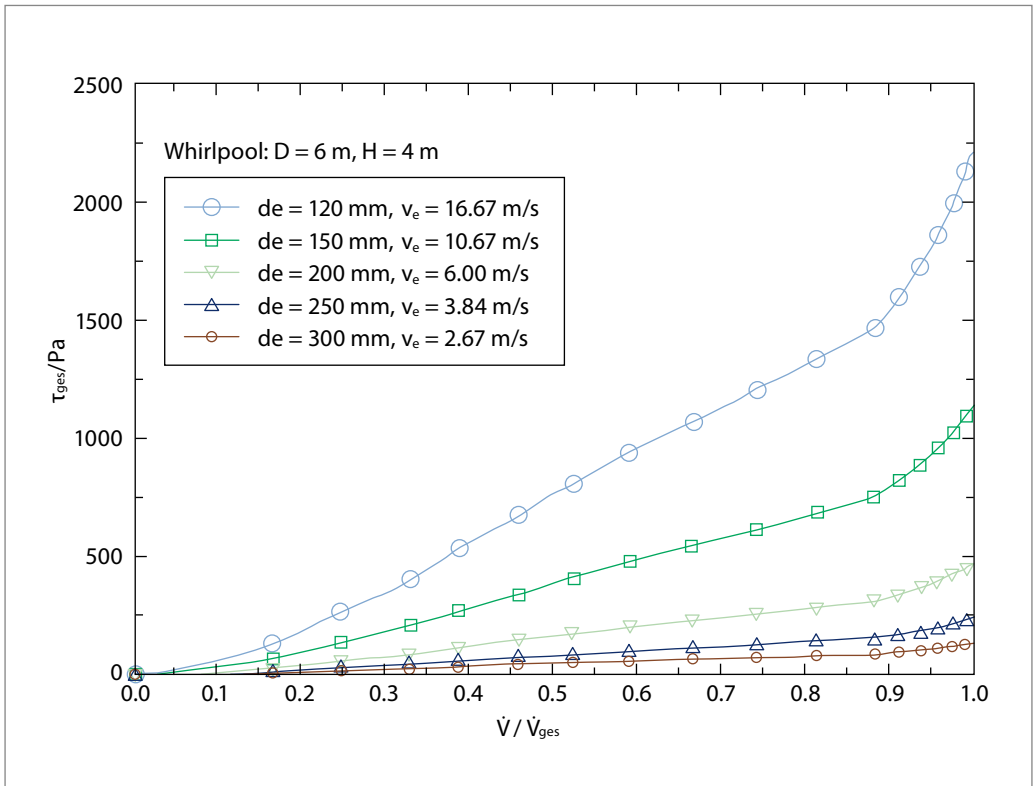
Wenn obendrein die Sedimentationsgeschwindigkeit der Heißtrubflocken groß gegenüber der durch den Toruswirbel induzierten Aufwärtsgeschwindigkeit ist, sind Korrekturmaßnahmen nicht erforderlich.

In Abbildung 30 wird die gemessene Schubspannungsverteilung

$$\tau_{\text{ges}} = \tau_{\text{visk}} + \tau_{\text{re}}$$

im Whirlpool-Einlaufstrahl in der Einlaufebene 10° in Abhängigkeit von der mittleren Einlaufgeschwindigkeit gezeigt.

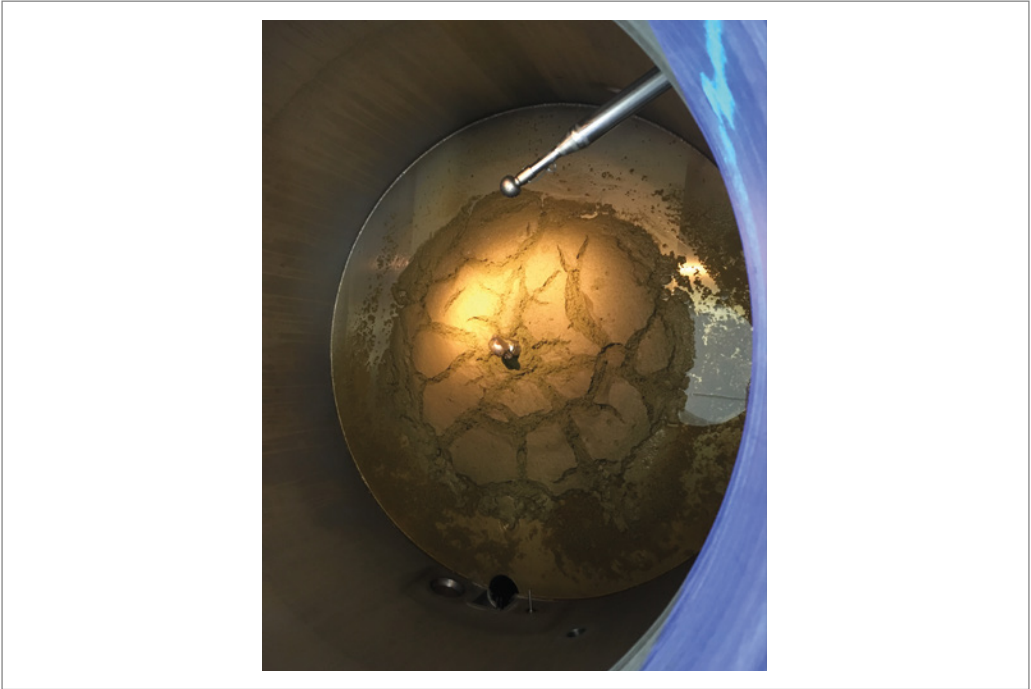
Abb. 30: Die Schubspannungsverteilung im Whirlpool-Einlaufstrahl bei konstantem Eintrittsvolumenstrom in der Messebene 10° (de: Einlaufdurchmesser) für alle Kurven entspricht der Einlaufvolumenstrom dem optimalen Whirlpool-Einlaufstrom



Man sieht den starken Anstieg der Schubspannung mit der Einlaufgeschwindigkeit v_e und kann ermes- sen, was den Würzeinhaltsstoffen angetan wird, wenn mit über 16 m/s in den Whirlpool eingeströmt wird. Noch eine kurze Erklärung zur Abzisse: Dort ist aufgetragen das Verhältnis \dot{V} / \dot{V}_{ges} , wobei \dot{V}_{ges} den gesamten Volumenstrom darstellt, also die Würzmenge, die pro Zeiteinheit in den Whirlpool fließt. Da die Schubspannung nicht gleichmäßig über den Strahlquerschnitt verteilt ist, muss die Teilmenge \dot{V} an- gegeben werden, die einem bestimmten Schubspannungsbereich unterworfen ist. So sei beispielhaft für Punkt $\dot{V} / \dot{V}_{ges} = 0,9$ und $\tau = 1.500$ Pa der obersten Kurve herausgegriffen. Dies bedeutet, dass 90 % der gesamten einströmenden Würze eine Schubspannung kleiner als oder gleich 1.500 Pa erfährt, 10 % aber nur eine Spannung größer als diese 1.500 Pa.

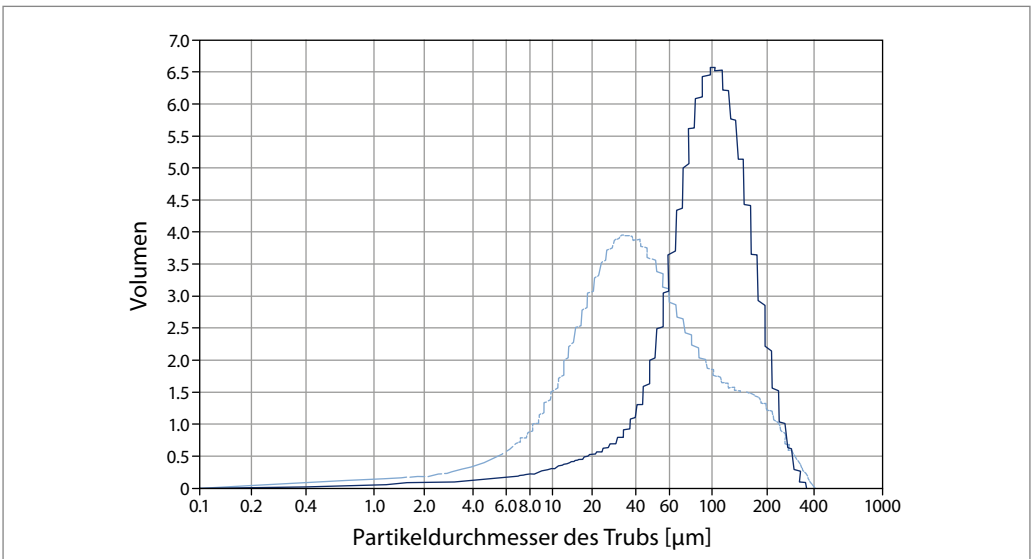
Durch zu hohe Scherbelastung beschädigte Würze, bzw. deren Inhaltsstoffe, sind gleichfalls häufig Ur- sache für mangelhafte Separation oder zerlaufende Trubhaufen, die dann durch entsprechende Maß- nahmen (siehe „Der Whirlpool“) behandelt werden müssen.

Abb. 31: Ein idealer Trubkegel nach der Whirlpoolarbeit, KRONES AG, Werk Steinecker Freising



In Abbildung 32 ist die Partikelgrößenverteilung des Gesamttrubs nach „High Stress Boiling“ und „Soft Boiling“ gegenübergestellt.

Abb. 32: Beispiel für die Partikelverteilung des Gesamttrubes nach „High Stress Boiling“ und „Soft Boiling“ (durch die logarithmische Auftragung der Partikelgrößen erscheinen die Peaks vergrößert)

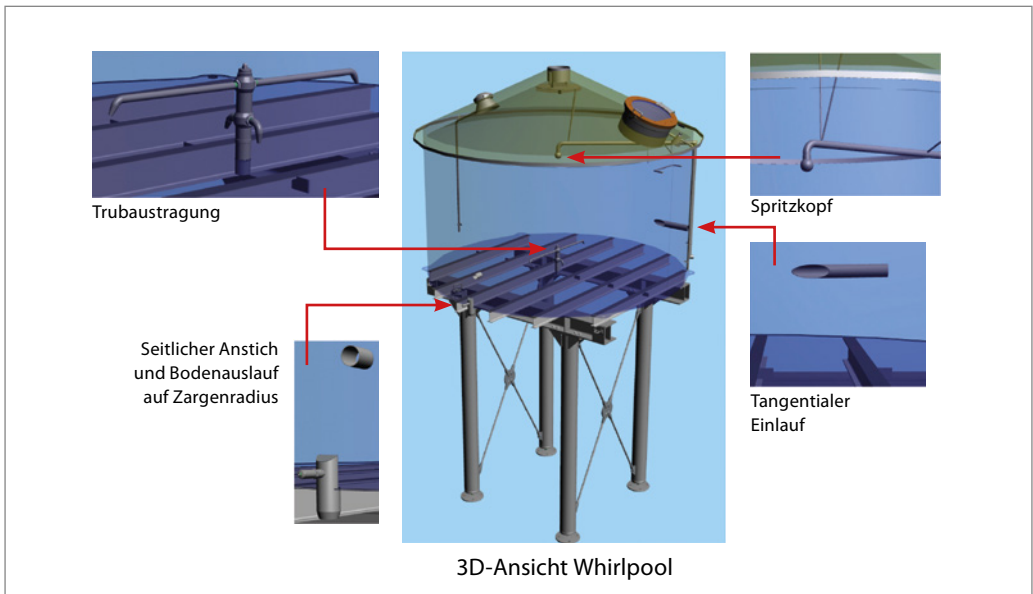


Ähnliche Bilder gewinnt man auch für den Heißtrub allein. Man beachte die doppellogarithmische Auftragung. Die sehr große Differenz in der Partikelgröße bewirkt nicht nur den Unterschied im Verhalten des Trubhaufens, sondern beeinflusst auch die Whirlpoolfähigkeit der Würze: je kleiner die Partikel, umso kleiner die Sedimentationsgeschwindigkeit und umso schlechter die Separation des Heißtrubs und umso stärker das Zerlaufen des Trubhaufens während des Ablaufens der Restwürze.

6.4.5 DIE ELEMENTE EINES WHIRLPOOLS

In seiner klassischen Form ist der Whirlpooltank oder Whirlpool ein rundes Gefäß mit flachen Boden mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser = 1:1. Aus der Notwendigkeit der Abtrennung von Hopfenpulvertreibern zusammen mit dem Heißtrub hat sich das Verhältnis allmählich auf 1:2–3,5 geändert.

Abb. 33: Wesentliche Elemente eines Whirlpools



Der Behälter wird um der Wärmerückgewinnung willen, aber auch um Konvektionsströmungen zu vermeiden, isoliert.

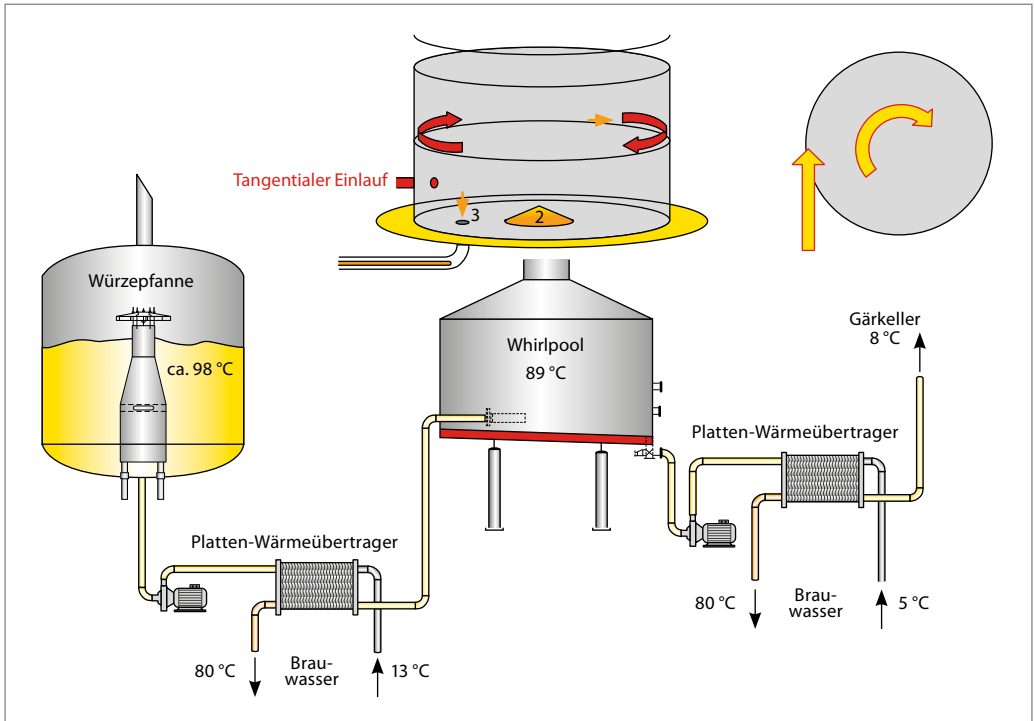
Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass keinerlei Einbauten im Whirlpool vorhanden sind, welche die sich im Whirlpool ausbildenden Strömungsverhältnisse stören. Derartige Einbauten würden den sogenannten „Teetasseneffekt“ zerstören und es würden sich in der Folge keine Trubkegel ausbilden.

6.4.6 DER WHIRLPOOLEINLAUF

Die Würze tritt mit tangentialem Strom in etwa 1/3 der Behälterhöhe ein, wobei der Einlauf der Düse so ausgeführt ist, dass bei einer Ausschlagzeit von 10–15 min eine Austrittsgeschwindigkeit von ca. 3,5 m/s erreicht wird.

Es ist darauf zu achten, dass die Ausschlagleitung stets tangential in den Whirlpooltank mündet und mit der Behälterwand sauber abschließt (also nicht in den Whirlpool hineinragt). Ein geringes Abweichen von der tangentialen Richtung wird zwar den Whirlpooleffekt nicht wesentlich stören, bedeutet jedoch Energieverlust durch vermeidbare Mischbewegung.

Abb. 34: Schematische Darstellung des Whirlpoeinlaufs

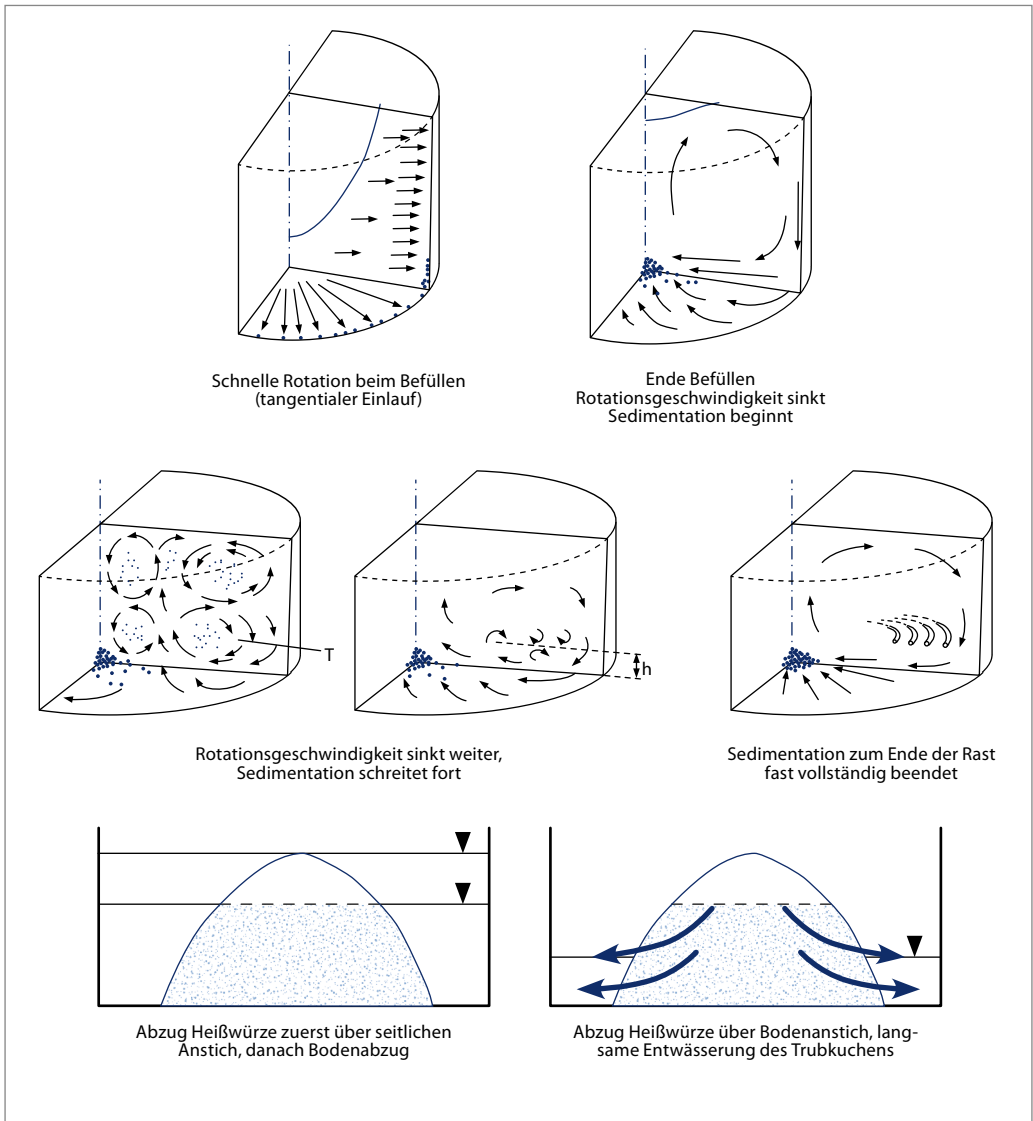


Der Inhalt des Whirlpooltanks wird dadurch in eine Rotationsbewegung versetzt (Primärströmung). Auf Grund des Kräftegleichgewichts an der freien Würzeoberfläche sinkt diese in der Mitte ab und es bildet sich der bekannte Rotationsparaboloid.

Nach dem Ende des Einlaufvorgangs und dem Abklingen aller damit verbundenen Strömungen stabilisiert sich die Rotationsströmung. Auf Grund der wirkenden Zentrifugalkräfte steigt der Druck in der Flüssigkeit von innen nach außen stetig an. Dieser Druckgradient wird der Bodenschicht aufgeprägt. Dadurch entsteht eine starke, spiralförmige Einwärtsströmung (Sekundärströmung) dicht über dem Behälterboden. Fast über den gesamten Behälterquerschnitt steigt nun die Würze wieder nach oben. Die große Querschnittsfläche bedingt eine geringe Aufstiegs geschwindigkeit der Würze im Vergleich zur Geschwindigkeit der Sekundärströmung.

6.4.7. DER VERFAHRENSABLAUF IM BILD

Abb. 35: Schematische Darstellung des Verfahrensablaufs im Whirlpool



6.4.8 DER TRENNEFFEKT DES WHIRLPOOLS

Die Trennung des Heißtrubs von der Würze ist ein physikalischer Effekt, der sich in der sogenannten Bodengrenzschicht des Whirlpoolbehälters abspielt (Abb. 27). Dort ist das Gleichgewicht zwischen den Druck- und Zentrifugalkräften, die durch die Rotation der Würze entstehen, gestört, so dass ein Sog in der Bodennähe des Whirlpools die ausflockenden Heißtrubteilchen zum Zentrum dieses Bodens befördert. Diese Erscheinung ist auch als sog. Teetasseneffekt bekannt: Teeblätter in einer umgerührten Teetasse bewegen sich entgegen der vermuteten Richtung nicht nach außen (entsprechend der Zentrifugalkraft), sondern zum Zentrum des Tassenbodens, wo sie auch liegenbleiben.

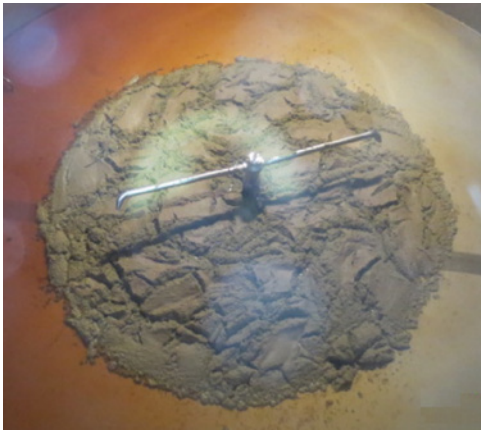
Wesentlich für das Funktionieren des Whirlpools ist das Absinken des ausgeflockten Heißtrubs in die Bodengrenzschicht. Hierfür sind nicht nur Sekundärströmungen hilfreich, wichtig ist v.a. eine ausreichende Sedimentationsgeschwindigkeit der Flocken. Ist diese nur sehr gering, so genügen schon kleine, nach oben gerichtete Sekundärströmungen (6.4.5.), um den schon abgesetzten Trub wieder aufzuwirbeln. Eine zu geringe Sedimentationsgeschwindigkeit ist auch der Grund, weshalb Würze, die zu hohen Schubspannungen ausgesetzt war und nur sehr kleine Flocken bildet, nicht whirlpoolfähig ist (je kleiner die Partikel, umso geringer ist nach dem Stokes'schen Widerstandsgesetz die Sedimentationsgeschwindigkeit).

6.4.9 DIE KONSISTENZ DES TRUBHAUFENS ODER TRUBKEGEL

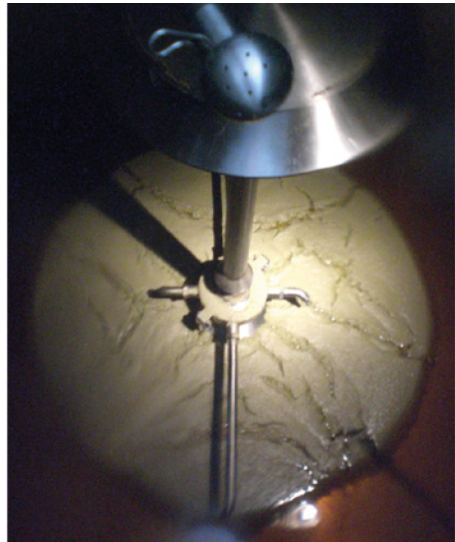
Allen Brauern ist das Zerfließen des Trubhaufens gegen Ende des Ablassens der Würze zum Plattenkühler bekannt. Schädlich ist dieser Effekt deswegen, weil dadurch sehr viel Heißtrub mit der schon klaren Würze mitgerissen wird.

Das Zerlaufen des Trubhaufens hat nichts mit der vorausgegangenen Separierung des Heißtrubs von der Würze zu tun. Es beruht vielmehr auf der Konsistenz des Haufwerkes, genauer auf dessen Durchlässigkeit für die Würze. Ist die Sickergeschwindigkeit im Trubhaufen, nachdem dieser beginnt aus der Würze herauszuragen, gleich der Sinkgeschwindigkeit des Würzespiegels, dann fällt der herausragende Teil des Haufens trocken (Abb. 35). Im anderen Fall verbleibt aber die Würze in diesem Teil des Haufens auf Grund des geringen hydrostatischen Überdruckes und sie strömt seitwärts aus und reißt Heißtrubfladen mit. Am Ende des Auslaufens der Würze bedeckt der Trub gleichmäßig den ganzen Whirlpool.

Abb. 36: Beispiele für Trubkegel



Klassischer Whirlpool



Whirlpool-Pfanne

Häufig wird auf Grund dieser Erscheinung das fehlerhafte Urteil gefällt, der Whirlpool arbeite schlecht. Es gibt oder gab Whirlpools, die zwar einen schönen Trubkegel produzieren, bei denen aber die Heißtrubseparierung sehr mangelhaft war, wie durch Messungen (Trübungsmesser und/oder Laboranalyse) festgestellt worden war. Auch die umgekehrte Kombination, nämlich gute Separation und zerlaufener Trubkegel, ist und war häufig anzutreffen. Von dem Trubverhalten kann man sich durch Augenschein überzeugen, die Güte der Separierung kann aber online nur mit einem Trübungsmesser exakt und reproduzierbar festgestellt werden. Es sei davor gewarnt, die Güte der Heißtrubabscheidung nur durch visuelle Beobachtungen der Klarheit der Würze in einem Schauglas zwischen Whirlpool und Würzekühler zu beurteilen. Man hat dadurch nur weitgehend gefühlsmäßige Aussagen, kennt nicht den zeitlichen Trübungsverlauf und hat kein Dokument in Form eines Messschriebes für eventuell erforderliche Fehlersuche oder Betriebsüberwachung.

6.4.10 DIE ÄUSSEREN BEDINGUNGEN FÜR EINEN FUNKTIONIERENDEN WHIRLPOOL

6.4.10.1 Die whirlpoolfähige Würze

In Kapitel 6.4.8. ist bereits angedeutet worden, dass die Würze bestimmte Eigenschaften haben muss, damit es im Whirlpool zu einem hinreichenden Trenneffekt kommt, der zu der klaren Würze führt. Es hat sich ein einfacher Versuch bewährt, mit dessen Hilfe die Whirlpoolfähigkeit der Würze leicht und schnell beurteilt werden kann.

Wird ein Imhoff-Trichter (1.000 ml Inhalt) zur Feststellung der äußeren Bedingungen für einen funktionsfähigen Whirlpool, also die Kontrolle einer whirlpoolfähigen Würze, verwendet, so muss dieser gut wärmeisoliert sein. Zwei gegeneinander liegende, von oben nach unten verlaufende Schlitze in der Isolation lassen mittels einer Lichtquelle die Sedimentation leicht beobachten. In einer gut whirlpoolfähigen Würze hat sich der Heißtrub nach ca. 5–6 min vollständig abgesetzt und die Würze über dem Sediment ist absolut klar. Bei extrem gut sedimentierenden Würzen kann dieses Resultat schon nach ca. 3 min erreicht sein, wogegen „Problemwürzen“ noch nach 10 min oder länger kein befriedigendes Bild ergeben. In diesem Fall und besonders bei nicht verschwindender Trübung der Würze über dem Sediment kann vom Whirlpool kein einwandfreies Funktionieren erwartet werden und die Ursache hierzu muss gesucht werden.

Die Würzprobe wird nach Beendigung des Kochvorgangs aus der Sudpfanne geschöpft und unter Vermeidung von Abkühlung in den Imhoff-Trichter eingefüllt. Sollte die Möglichkeit bestehen, die Probe aus der Ausschlagleitung zu entnehmen, hätte dies den Vorteil, eventuelle Fehlerquellen stromaufwärts zum Whirlpool auch noch aus diesem Anlagenteil mitzuerfassen.

Whirlpoolfähige Würzen erlauben eine Whirlpoolrast von 10, maximal 20 min.

6.4.10.2 Mögliche Fehler in der Würzebehandlung stromaufwärts vom Whirlpool

Nahezu alle stromaufwärts vom Whirlpool gelegenen Komponenten des „Systems Sudhaus“ können als potentielle Störquellen in Frage kommen. Es sind dies im Einzelnen:

- mangelhafte Läuterung oder schlechte Maischefilterung,
- zu hohe Scherbelastung der Würze in Rohrleitungen (zu hohe Strömungsgeschwindigkeit zu große Rohrlängen), in Krümmern (unnötig große Anzahl, zu kleine Krümmungsradien) und in T-Stücken.

Nähere Angaben zu den zulässigen mittleren Geschwindigkeiten:

Whirlpool-Einlauf	m/s	3,5
Gerades Rohr (ohne Einlaufströmung)	m/s	4,0
90°-Kurve $r/d = 2,2$	m/s	2,5
90°-Kurve $r/d = 1,8$	m/s	2,0
T-Stück 90°, $V_1/V_3 = 1$	m/s	1,0
T-Stück 90°, $V_1/V_3 = 0,5$	m/s	1,3
Maximal zulässige Scherbelastung in Heißwürze $T_{\text{max. zulässig}}$	Pa	50

Gültig für eine Heißwürze in einem Temperaturbereich zwischen 90 und 100 °C

- fehlerhafte Auslegung der im Heißwürzeweg befindlichen Kreiselpumpen (die Arbeitspunkte der Pumpen liegen weit außerhalb des Bereichs des optimalen Wirkungsgrades)
- fehlerhafte Auslegung der Sudpfanne (zu hohe Scherbelastung der Würze, ungleichmäßige Wärmebehandlung).

Erst wenn diese potentiellen Fehlerquellen untersucht und gegebenenfalls beseitigt sind, ist es sinnvoll, vom Whirlpool einwandfreie Resultate zu erwarten.

6.4.10.3 Die Würzebeschaffenheit

Die Würze kann aber auch von Seiten der Rohstoffe oder der vorangegangenen Verfahrensschritte ungünstig beschaffen sein:

- Durch inhomogene Malze mit hoher Viskosität, zu knappe Maischverfahren, unbefriedigende Würzekochung, Einwirkung von Scherkräften,
- Durch trübe feststoffreiche Abläuterung bei Maischefiltern und Kunststofftüchern, durch Vorderwürzeabzug „von oben“ ergibt sich eine Disposition für einen schlechten Kläreffekt bzw. eine mangelhafte Festigkeit des Trubkuchens,
- Ein sehr geringer pH-Wert der Ausschlagwürze von 5,0–4,9 vermittelt einen weniger grobflockenden Trub, der langsamer sedimentiert und auch eine lockeren Trubkuchen liefert, der zum Auseinanderfließen tendiert. Es ist zweckmäßig, sehr niedrige pH-Werte (z.B. Würzen für alkoholfreie Biere) erst zwischen Whirlpool und Plattenkühler einzustellen, wobei aber noch die erforderlichen Pasteur-Einheiten zur Abtötung der Milchsäurebakterien eizuhalten sind.

6.4.11 Die optimale Auslegung des Whirlpools

6.4.11.1 Die Störquellen im Whirlpool selbst

Die Ursachen für unbefriedigende Arbeit des Whirlpools können wie folgt beschrieben werden:

- Zu hohe Einlaufgeschwindigkeit in den Whirlpool während des Ausschlagens verursacht zu hohe Scherbelastung der Würze,
- Zu starke Sekundärströmungen in Zusammenhang mit zu geringer Sedimentationsgeschwindigkeit behindern die Heißtrubseparation,
- Nicht angepasste Auslassgeschwindigkeit der Restwürze verursacht das Auseinanderlaufen des Trubhaufens,
- Hinzu kommen noch Konstruktions- und Auslegefehler, wie z.B. ungünstige Höhe/Durchmesser (H/D)-Verhältnis (H ist der Würzestand im gefüllten Whirlpool), störende Einbauten (Leitern, Rohre), ungünstig angeordnete Ablassöffnungen.