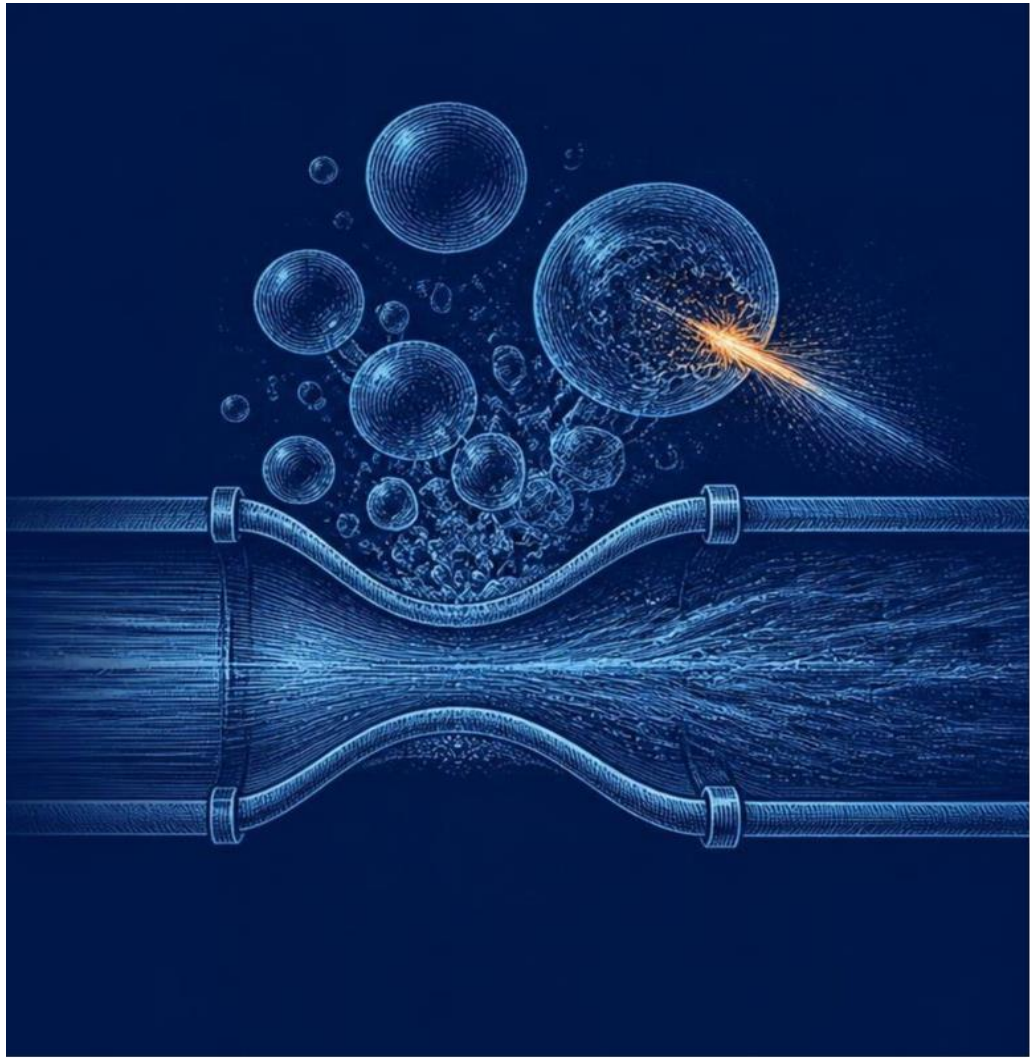


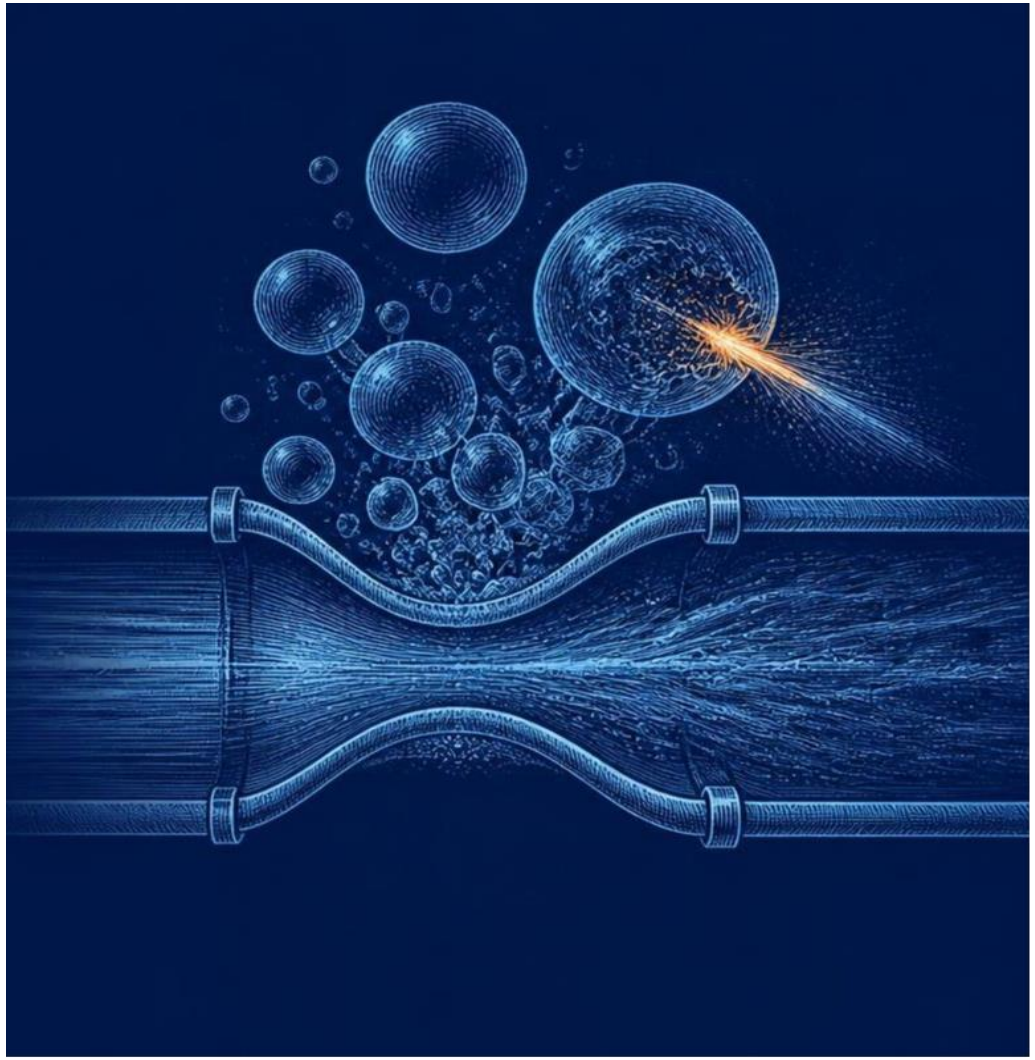
Hydrodynamische Kavitation in der Wasseraufbereitung

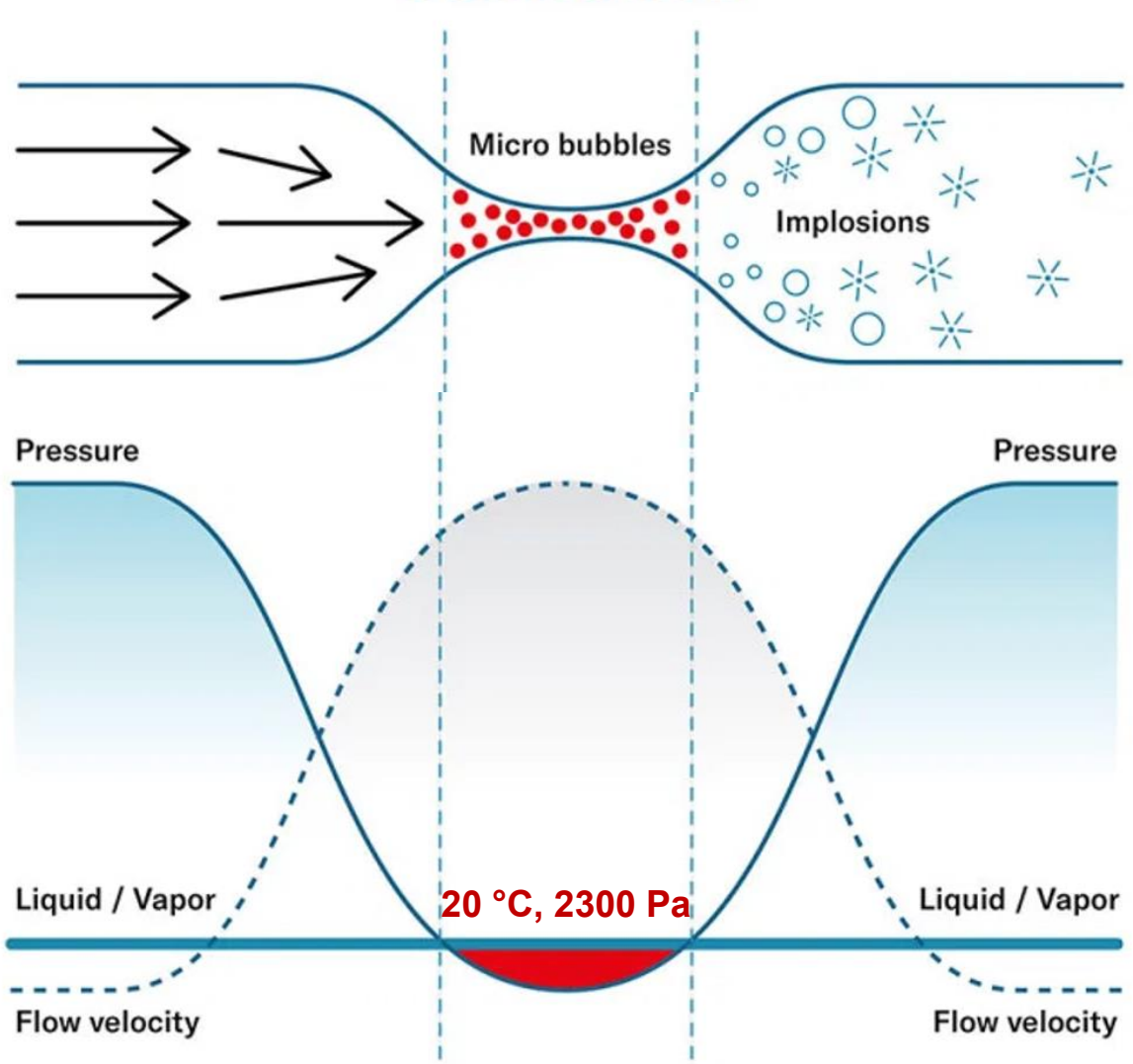
Blasenkollaps als Werkzeug

Boris Mey

Made with GAMMA

Hydrodynamic Cavitation (HC)



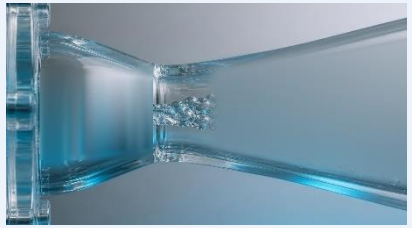


Made with GAMMA

https://keller-pressure.com/de/unternehmen/blog/druckspitzen-in-geschlossenen-systemen

Hydrodynamische Kavitation in fünf Phasen

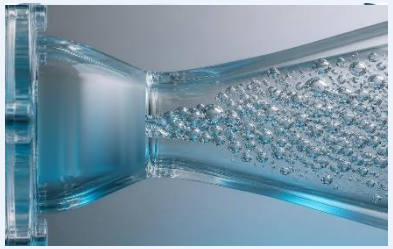
1



Keimbildung & Wachstum

Beschleunigung senkt den Druck unter den Dampfdruck. An Gas- oder Staubkeimen wachsen Dampfblasen.

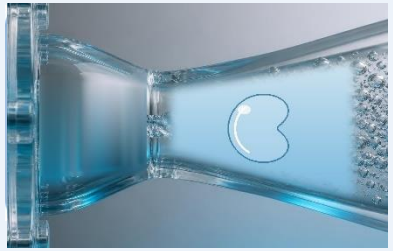
2



Transport & Deformation

Die Strömung trägt die Blasen in höheren Druck. Das Wachstum stoppt; die Kugelform wird instabil.

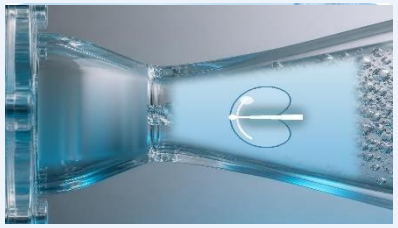
3



Asymmetrischer Kollaps

Außendruck übersteigt Innendruck; Dampf kondensiert. Die Blasen kollabieren einseitig.

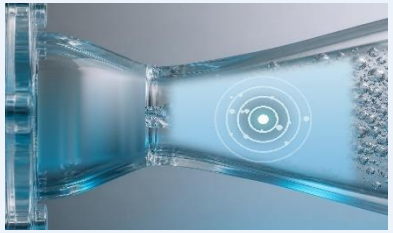
4



Ausbildung des Mikrojets

Ein nadelförmiger Strahl durchstößt die Blase und schießt mit mehreren hundert m/s auf die Oberfläche zu.

5



Implosion & Schockwelle

Ringwirbel zerfällt; fokussierte Schockwellen entstehen. Lokal: mehrere tausend Bar und Kelvin.

Gezielt genutzt in der Verfahrenstechnik

Abwasserreinigung

Schadstoffe werden zerstört

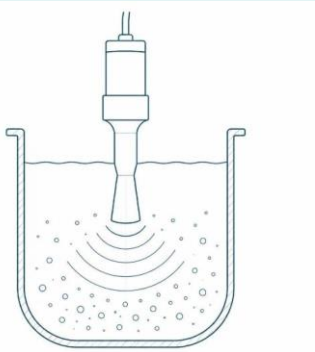
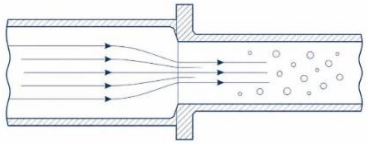
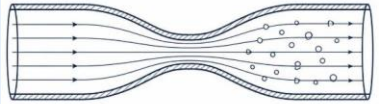
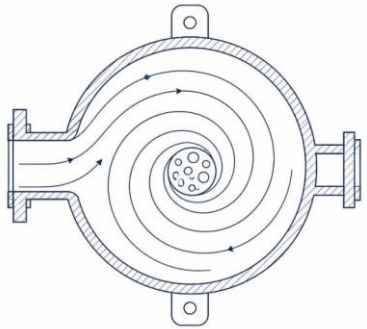
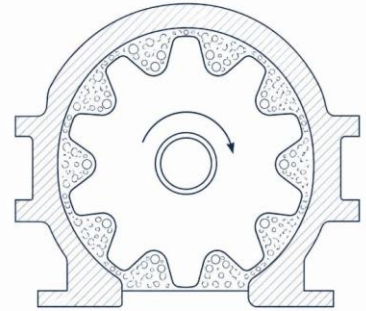
Emulgierung

Feinstverteilung von Flüssigkeiten

Biogasanlagen

Biomassen werden zerkleinert

Kavitationserzeugung: Reaktortypen und Anwendungen

AKUSTISCH	HYDRODYNAMISCH			
SCHALL	VERENGUNG	VERENGUNG	WIRBEL	SCHERUNG
				
Ultraschall	**Blende**	**Venturidüse**	**Vortex**	**Rotor-Stator**
Schallwellen erzeugen Blasen	Abrupter Querschnittssprung	Sanfte Verengung und Aufweitung	Tangentialer Einlass, Wirbel	Enger Spalt, Scherimpulse
ANWENDUNG	**ANWENDUNG**	**ANWENDUNG**	**ANWENDUNG**	**ANWENDUNG**
• Labor • Pharma	• Emulsionen • **Warmwasserkreis-läufe (Legionellen)**	• **Wasseraufbereitung** • Biodiesel	• Reinigung • Zähe Medien	• Biomasse • Großanlagen

Quellen: Zheng, Zheng, Zhu (2022), Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors, Engineering 19, 180–198, doi:10.1016/j.eng.2022.04.027; Li, Li, Li (2025), Progress in the Understanding and Modeling of Cavitation and Related Applications, FDMP 21(3); Zhang et al. (2025), Rotational cavitator, Ultrason. Sonochem. 124, 107727

Made with GAMMA

Prof. Dr.-Ing.
Schmid Andreas

Bewertung verschiedener Formen der Kavitationserzeugung

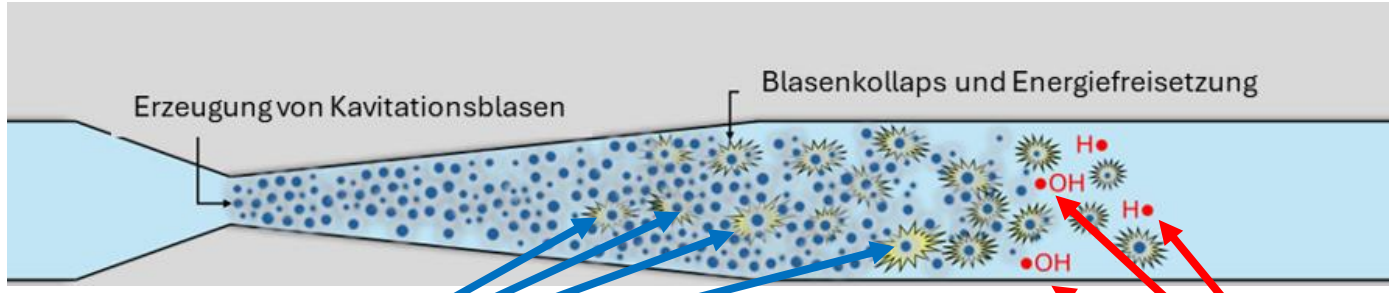
iwe
Institut für Wasserstoff- und Energietechnik der Hochschule Hof

	Ultraschall	Blende	Venturidüse	Vortex	Rotor-Stator
Hohe Volumenströme [mehrere m^3/h]	nein	nein	ja	moderat eher nein	ja
Superkavitation	nein	sehr gering	hoch	gering	nein
Scale-up in Großtechnik	schwierig	schwierig	ja	ja	ja
Erosion, Korrosion, Verschleiß	keine Aussage möglich	hoch	gering	gering	sehr hoch
Komplexe Technologie	ja	nein	nein	nein	ja
Anforderungen an Anwender	hoch	gering	gering	gering	hoch
Investitionskosten	hoch	gering	gering	gering	hoch
Betriebskosten	sehr hoch	hoch	gering	gering	sehr hoch

Quelle: Andreas Schmid, Institute for Hydrogen and Energy Technology, University of Applied Sciences Hof, Alfons-Goppel-Platz 1, Hof 95028, Germany, E-mail: andreas.schmid@hof-university.de

Venturidüse ➔ Gasblasen ➔ Implosionen ➔ Effekte





Bernoulli-Effekt

Druckabsenkung in schneller Strömung erzeugt lokale Dampfblasen

Blasenimplosion

Kollaps im Überdruckbereich innerhalb kürzester Zeit

Hot spots

Mikro-Jets und Stoßwellen mit hohen Druck- und Energiedichten

Advanced Oxidation Prozesses (AOP)

Bildung hochreaktiver Spezies
Unspezifische Spaltung jedweder organischer Bindungen

Hot spots:
bis zu 5000 K ➔ Pyrolyse organischer Materie
➔ Hydrolyse von Wasser
bis zu 1000 atm ➔ Scherkräfte ➔ Partikelabbau

Wasserhydrolyse zu Radikalen und ROS:
•OH, •H, •O, Singulett-Sauerstoff,
Wasserstoffperoxid, Superoxid-Anionradikale

Quelle: Andreas Schmid *, Oldrich Simek, Paola Acosta-Carrascal and Axel Wolfram. Influencing biogas synthesis rate of laundry wastewater by hydrodynamic cavitation. Water Practice & Technology Vol 20 No 1, 141 doi: 10.2166/wpt.2025.005

Made with GAMMA

Unspezif. Detoxifikation von Schadstoffen in Roh- und Reinwasser

Hybride Anwendung:

Hydrodynamische Kavitation (HC) + Zusatz von O_3, H_2O_2 oder Fenton-Reagenz zur Verstärkung AOP

A-STOFFE | RADIOAKTIV

Radionuklide • radiologische Kontaminanten • A-Kampfstoffe

NICHT durch Kavitation/AOP zerstörbar

Radionuklide:
physikalisch unverändert, Radioaktivität wird nicht abgebaut.

HC/AOP verändern die Speziation und konditionieren das Wasser zur Abtrennung der radionuklidhaltigen Phase.nach Phasentrennung

B-STOFFE | MIKROBIOLOGISCH

Bakterien • Viren • Protozoen • Hefen/Pilze • B-Kampfstoffe

→ mechanische Desintegration und oxidative Schädigung → Inaktivierung

Viren:
Scherkräfte, Stoßwellen und reaktive Spezies (z. B. OH-Radikale) schädigen Virushülle bzw. Kapsid und Nukleinsäuren; die Empfindlichkeit hängt vom Virustyp ab.

C-STOFFE | CHEMISCH

Arzneimittel • Pestizide • toxische Organika • z.T. PFAS • C-Kampfstoffe

→ oxidative Molekülspaltung → Transformation → ggf. Mineralisation

PFAS:
besonders anspruchsvoll aufgrund der stabilen C–F-Bindungen; vollständige Zerstörung nicht pauschal voraussetzen.

Quellen: Song et al. (2025); Miklos et al. (2018); Sun et al. (2020); Jawaduddin et al. (2026); Kokkinos et al. (2021). DOI siehe Präsentationsnotizen.

Made with GAMMA

Erklärung zu Interessenkonflikten (COI)



Der Vortragende erklärt, dass **keine wirtschaftlichen, persönlichen oder finanziellen Verbindungen** zu den in dieser Präsentation genannten Unternehmen oder deren Produkten bestehen.



Die Auswahl der Systeme (Dryden Aqua, PoolTiger, Wilo Steinhardt, RAPTECH, E-PIC) dient **ausschließlich der wissenschaftlich-technischen Veranschaulichung** marktgängiger Prinzipien.



Es wurden **keinerlei Zuwendungen, Honorare oder Sponsoringgelder** von den Herstellern für die Erstellung dieses Beitrags entgegengenommen. Der Vortrag ist produktneutral und unabhängig.

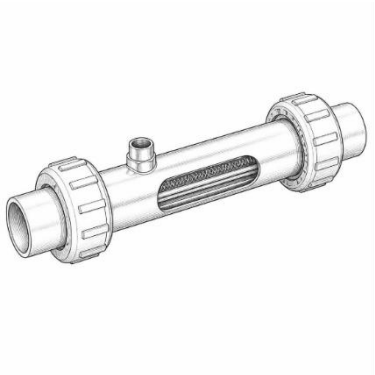
Kommerziell verfügbare Systeme zur HC (Beispiele)

SYSTEM (Firma)	Kosten	Prinzip	ZWECKBESTIMMUNG
Zeta Potential Mixer (Dryden Aqua)	210–1.500 €	Statische Strömungsgeometrie; lokaler Druckabfall	**Schwimmbad:** Flocken zerschlagen, Keimreduktion, weniger Chlorung
Pool Tiger (Pool Tiger)	1.500–5.000 €	Statische Strömungsgeometrie; rotierende Mikro-Wirbel	**Schwimmbad:** Inline nach Filtration, baut Algen und Bakterien ab
DilliGent LegioTec (Wilo Steinhardt)	auf Anfrage	Hydromechanische Kavitation; Teilstrom Warmwasser, ersetzt Zirkulationspumpe	**Legionellenprävention (Warmwasser)** Chemiefrei, entfernt Bakterien; verhindert Wiederverkeimung, baut Biofilm ab
CaviFlow (RAPTECH)	ab 40.000 €	Multi-Düsen-Modul; Hochdruckbetrieb	**Industrielle Rohwasseraufbereitung:** Keimreduktion, CSB/BSB-Reduktion
ROTOCAV (E-PIC S.r.L.)	ab 50.000 €	Rotierender Reaktor; Rotor-Stator-Anordnung	**Industrielle Rohwasseraufbereitung:** Schadstoffreduktion (chemisch, mikrobiologisch)

Quellen: Herstellerangaben (Dryden Aqua, PoolTiger, Wilo Steinhardt, RAPTECH, E-PIC S.r.l.), Stand 10/2026. Preisangaben sind Richtwerte ohne

Made with GAMMA

Konstruktionsweise der vorgestellten Kavitationsreaktoren (schematische KI-Skizzen)



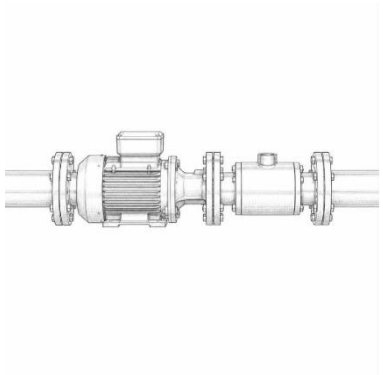
Zeta Potential Mixer (Dryden Aqua)

Kompaktes Edelstahl-Rohrstück mit statischen Finnen



Pool Tiger (Pool Tiger)

Zylindrisches Inline-Bypass-Modul für Pool-Verrohrungen



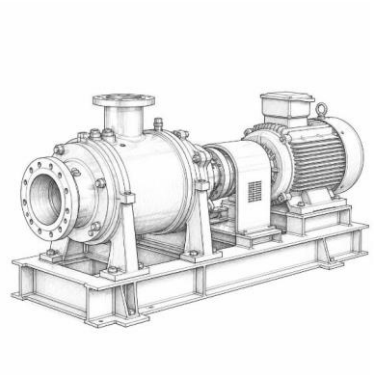
DilliGent® LegioTec (Wilo Steinhardt)

Kompakte Inline-Einheit für Warmwasserkreisläufe, ersetzt Zirkulationspumpe



CaviFlow® (RAPTECH)

Industrielles Flansch-Modul mit integrierten Kavitationsdüsen



ROTOCAV (E-PIC S.r.l.)

Schwerer, motorbetriebener Rotations-Kavitationsreaktor

Schematische, KI-generierte Skizzen zur Veranschaulichung der jeweiligen Bauprinzipien; keine Produktabbildungen.

Made with GAMMA

Einsatz bei den Streitkräften

Mobilität

Kompakte Reaktoren für Feldlager

Prozesssicherheit

Robustes Verfahren, auch bei wechselnder Rohwasserqualität

Geringer Aufwand

Geringer Ausbildungsbedarf
Geringer Wartungsbedarf

Logistik

Weniger Filter- und Adsorptionsmedien entlasten Nachschub, Transport und Umwelt



Wissenslücken zur hydrodynamischen Kavitation in der Wasseraufbereitung

01	**Scale-up & Reaktordesign** Keine übertragbaren Auslegungskriterien · Begrenzte Skalierbarkeit von Labor-/Pilotanlagen	Lei et al. (2024), Journal of Water Process Engineering
02	**Reale Wassermatrizes** Modellwässer begrenzt auf reale Abwässer übertragbar · Matrixeffekte unzureichend verstanden	Albanese (2026), Pollutants
03	**Transformationsprodukte & Toxizität** Abbau ist nicht zwangsläufig vollständige Mineralisierung · Toxizität stärker untersuchen	Wang et al. (2021), Chemical Engineering Journal
04	**Kavitationsmechanismen** Mechanische, thermische und radikalische Effekte beim Blasenkollaps quantitativ unvollständig beschrieben	Voroshchuk et al. (2025), Economics and Environment
05	**Energieeffizienz & Wirtschaftlichkeit** Keine belastbaren Vergleiche mit etablierten Verfahren · Langzeitbetrieb, Skalierbarkeit offen	Agarkoti et al. (2021), Journal of Environmental Management

Robuste Trinkwasseraufbereitung mittels HC steigert Resilienz der KRITIS

Präventiver Schutz

HC ist eine effiziente und effektive Präventivmaßnahme gegen chemische und mikrobiologische Belastungen des Trinkwassers

Hybridsysteme

HC mit Zudosierung von von Ozon, H_2O_2, Fenton-Reagenz o.ä.
Die Kombination aus HC und AOP ist am effektivsten.
Hybridsysteme bieten einen optimalen unspezifischen Schutz.

Ausblick

HC sollte routinemäßig in der Rohwasseraufbereitung zum Einsatz kommen, um die Trinkwassersicherheit im zivilen und militärischen Bereich mit relativ geringem Aufwand deutlich zu steigern



Dank an:



Prof. Dr.-Ing.
Andreas Schmid

iwe
Institut für Wasserstoff- und Energietechnik der Hochschule Hof

https://pixabay.com/de/ Pixabay: kosten- und lizenzfreie Bilder KI-generierte Bilder (Gamma)



https://pixabay.com/de/ Pixabay: kosten- und lizenzfreie Bilder KI-generierte Bilder (Gamma)