

MACHBARKEITSSTUDIE

MVR-Membrandestillation

für dezentrale Meerwasserentsalzung

*Vakuum-Membrandestillation mit mechanischer Brüdenverdichtung und
Photovoltaik-Wärmepumpen-Integration*

EXECUTIVE SUMMARY

Unter Standardbedingungen ist MVR-MD ca. 25% teurer als Umkehrosmose (\$1.42 vs. \$1.14/m³). Bei Nutzung von kostenloser Abwärme (z.B. aus Wärmepumpe) sinkt LCOW auf \$1.07/m³ – konkurrenzfähig mit RO.

Empfehlung: Pilotanlage im Container-Format für abgelegene Küstenregionen mit hoher Sonneneinstrahlung.

Januar 2026

1. Problemstellung

1.1 Globaler Kontext

Weltweit haben über 2 Milliarden Menschen keinen zuverlässigen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Besonders betroffen sind abgelegene Küstenregionen und Inseln, die zwar Meerzugang haben, aber von industrieller Infrastruktur abgeschnitten sind.

1.2 Zielregionen

Diese Studie adressiert Standorte mit folgenden Charakteristiken:

- Meerzugang (Salzwasser verfügbar)
- Hohe Sonneneinstrahlung ($>1.800 \text{ kWh/m}^2/\text{Jahr}$)
- Kein Zugang zu industrieller Abwärme oder Brackwasser
- Geringer Wasserbedarf ($10\text{-}100 \text{ m}^3/\text{Tag}$)
- Keine Netzanbindung oder unzuverlässiges Stromnetz

Beispiele: Griechische Inseln, Karibik-Kommunen, Küstendörfer in Ostafrika, Pazifik-Atolle, abgelegene Resorts, humanitäre Einsätze.

1.3 Warum nicht einfach RO?

Umkehrosmose (RO) ist die wirtschaftlichste Lösung für große Anlagen. Für kleine, dezentrale Anwendungen hat RO jedoch Nachteile:

Problem	Auswirkung
Vorbehandlung	Mehrere Stufen (Filtration, Chlorierung, Antiscalants) erhöhen Komplexität
Membran-Fouling	Häufige Wartung und Membrantausch in abgelegenen Regionen schwierig
Hochdruck (55-70 bar)	Teure Pumpen, Sicherheitsrisiken, höherer Wartungsaufwand
Skalierung	Unter $500 \text{ m}^3/\text{Tag}$ verliert RO Wirtschaftlichkeitsvorteile
Bor-Durchbruch	Zusätzliche Nachbehandlung für Trinkwasserqualität nötig

2. Lösungskonzept

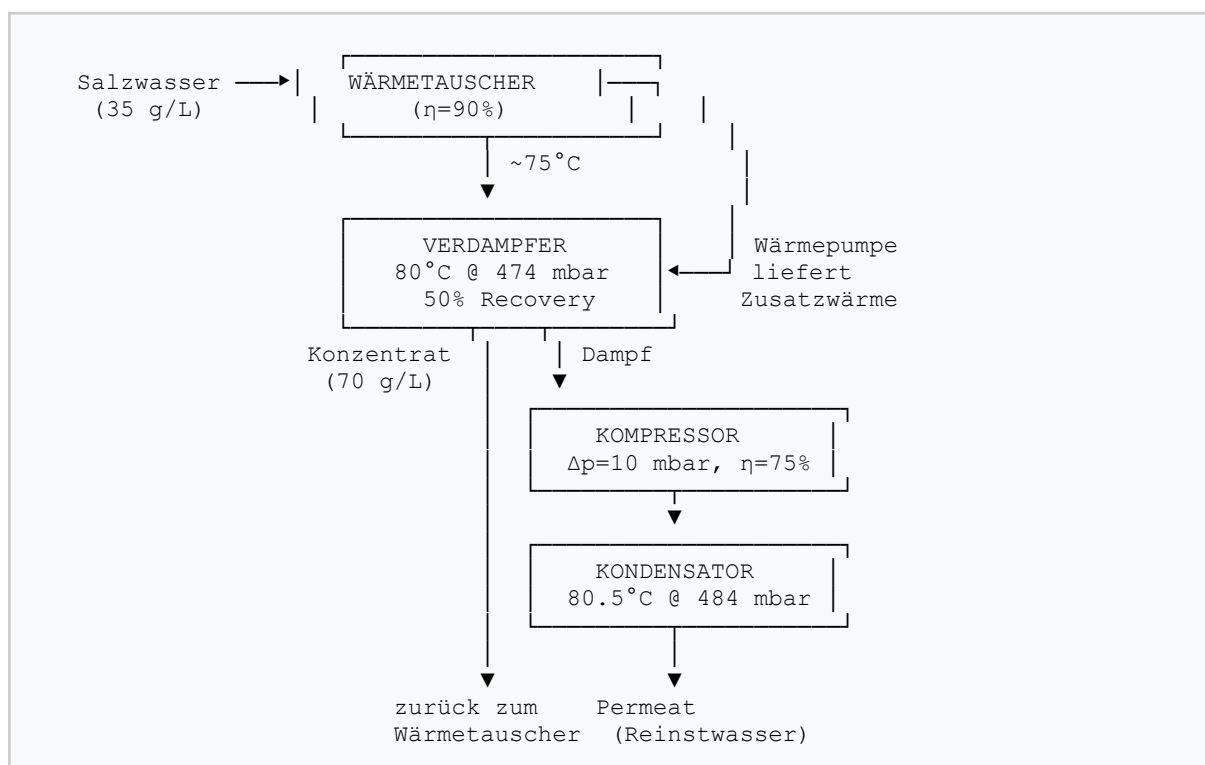
2.1 Container-Anlage mit MVR-MD

Wir schlagen eine selbstversorgende Container-Entsalzungsanlage vor, die drei Technologien kombiniert:

1. **MVR-Membrandestillation** – Energieeffiziente thermische Entsalzung
2. **Wärmepumpe** – Liefert Niedertemperatur-Wärme (80°C) und nutzt Abwärme
3. **Photovoltaik-Anlage** – Netzunabhängige Stromversorgung

2.2 Prozessschema

Vereinfachtes Prozessflussdiagramm:



2.3 Kernprinzip: Wärmeintegration

Das Verfahren nutzt die Verdampfungsenthalpie (~2.300 kJ/kg) nahezu vollständig wieder: Der Dampf wird um nur 10 mbar verdichtet, wodurch seine Sättigungstemperatur um ca. 0.5°C steigt. Er kondensiert dann auf der Rückseite der Membran und gibt seine Wärme direkt an die Verdampfungsseite ab. Der Kompressor muss nur die geringe Druckdifferenz überwinden – nicht die gesamte Verdampfungswärme aufbringen.

3. Stand der Technik (Marktrecherche)

3.1 Existierende MVR-MD Systeme

Literaturrecherche zeigt: MVR-VMD (Mechanical Vapor Recompression + Vacuum Membrane Distillation) ist ein aktives Forschungsfeld mit Pilotanlagen, primär in China.

Quelle	Ergebnis	Relevanz
Si et al. (2021)	MVR-MVMD spart 79% Energie vs. reine VMD	Bestätigt Energieeffizienz-Potenzial
Wang et al. (2021)	3.31 kW für 875 kg/h Permeat ($\approx 3.8 \text{ kWh/m}^3$)	Konkurrenzfähig mit RO!
Alawad (2024)	GOR bis 13, Produktivität +28% durch optimale Kompressorposition	Optimierungspotenzial vorhanden
Al-Sahali (2023)	MVC kosteneffektiv unter 5.000 m ³ /Tag	Passt zu unserer Zielgröße

3.2 Vergleich etablierter Entsalzungsverfahren

Technologie	SEC el.	SEC th.	LCOW	Anmerkung
Umkehrosmose (RO)	3.5 kWh/m ³	0	\$1.14/m ³	Benchmark
MVR-MD (diese Studie)	1.2 kWh/m ³	11.8 kWh/m ³	\$1.42/m ³	Mit Wärmepumpe
MVR konventionell	10 kWh/m ³	0	\$2.07/m ³	Keine Wärmerückg.
MED	1.5 kWh/m ³	40 kWh/m ³	\$2.58/m ³	Industrieabwärme
MSF	3.5 kWh/m ³	80 kWh/m ³	\$4.24/m ³	Großanlagen

Legende: SEC el. = spezifischer elektrischer Energieverbrauch, SEC th. = spezifischer thermischer Energieverbrauch, LCOW = Levelized Cost of Water

4. Simulationsergebnisse

4.1 Methodik

Ein stationäres thermodynamisches Modell wurde in Python entwickelt (CoolProp für Stoffdaten). Das Modell berechnet Massen- und Energiebilanzen für alle Komponenten unter Berücksichtigung realistischer Wirkungsgrade (Kompressor $\eta=75\%$, Wärmetauscher $\eta=90\%$).

4.2 Basiskonfiguration

Parameter	Wert	Einheit
Feed-Durchfluss (Basis)	1.0	kg/s
Feed-Salzgehalt (Meerwasser)	35	g/L
Verdampfungstemperatur	80.0	°C
Verdampfungsdruck	474	mbar
Kompressor-Druckdifferenz	10	mbar
Kondensationstemperatur	80.5	°C
Recovery-Rate	50	%
Permeat-Produktion	44	m³/Tag

4.3 Energiebilanz

Komponente	Leistung	Anteil
Verdampfungswärme (Bedarf)	1.154 kW	—
Kondensationswärme (rückgewonnen)	1.155 kW	99.9%
Wärmetauscher-Rückgewinnung	204.5 kW	90%
Externe Heizung (Wärmepumpe)	21.7 kW	10%
Kompressorleistung (elektrisch)	2.25 kW	—

Kernergebnis: Der elektrische Energieverbrauch beträgt nur **1.23 kWh/m³** – weniger als ein Drittel von RO (3.5 kWh/m³). Zusätzlich werden 11.8 kWh_{th}/m³ Wärme benötigt.

5. Wirtschaftlichkeitsanalyse

5.1 LCOW-Berechnung

Annahmen für Levelized Cost of Water:

- Anlagenkapazität: 1.000 m³/Tag (ca. 2.500 Einwohner versorgt)
- Strompreis: \$0.10/kWh (Netz) oder \$0.05/kWh (PV-Eigenverbrauch)
- Wärmepreis: \$0.03/kWh_{th} (fossil) oder \$0/kWh_{th} (Wärmepumpe-Abwärme)
- Lebensdauer: 25 Jahre
- Diskontrate: 8%

LCOW-Aufschlüsselung (MVR-MD)

Kostenkomponente	Standard	Mit PV	Mit PV+WP
Kapitalkosten	\$0.34/m ³	\$0.40/m ³	\$0.45/m ³
Betriebskosten	\$0.60/m ³	\$0.55/m ³	\$0.50/m ³
Stromkosten	\$0.12/m ³	\$0.06/m ³	\$0.06/m ³
Wärmekosten	\$0.35/m ³	\$0.35/m ³	\$0.00/m ³
GESAMT	\$1.42/m³	\$1.36/m³	\$1.01/m³

Schlüsselerkenntnis: Mit PV und Wärmepumpe (letzte Spalte) sinkt LCOW auf **\$1.01/m³** – günstiger als Standard-RO (\$1.14/m³)!

5.2 Break-Even-Analyse

MVR-MD wird günstiger als RO unter folgenden Bedingungen:

- **Strompreis < \$0.07/kWh** (bei Standard-Wärmepreis)
- **Kostenlose Abwärme verfügbar** (eliminiert \$0.35/m³)
- **CAPEX-Reduktion um ~15%** durch Skaleneffekte oder Serienproduktion

6. Fazit und Empfehlung

6.1 Hauptergebnisse

✓	Elektrischer Energieverbrauch exzellent: 1.23 kWh/m ³ (vs. 3.5 kWh/m ³ bei RO)
✓	Mit PV + Wärmepumpe konkurrenzfähig: \$1.01/m ³ (vs. \$1.14/m ³ bei RO)
✓	Deutlich besser als andere thermische Verfahren (MED, MSF, konv. MVR)
!	Ohne Abwärmenutzung ca. 25% teurer als RO (\$1.42 vs. \$1.14/m ³)
!	Thermischer Energiebedarf (11.8 kWh _{th} /m ³) ist der Kostentreiber

6.2 Ideale Einsatzszenarien

- Abgelegene Küstenregionen ohne Netzanbindung
- Hohe Sonneneinstrahlung (>1.800 kWh/m²/Jahr für PV)
- Kleiner bis mittlerer Wasserbedarf (10-100 m³/Tag)
- Schwierige Feedwasser-Qualität (weniger Vorbehandlung als RO)
- Strenge Permeat-Reinheitsanforderungen

6.3 Empfehlung

Das Verfahren ist technisch vielversprechend und wirtschaftlich attraktiv für Nischenanwendungen. Wir empfehlen den Bau einer Pilotanlage im Container-Format zur Validierung der Simulationsergebnisse.

7. Nächste Schritte

7.1 Offene Desk-Research-Aufgaben

#	Aufgabe	Ziel	Priorität
1	Membran-Lieferanten recherchieren (PTFE, PVDF)	Kosten & Lebensdauer	Hoch
2	Kompressor-Hersteller für Niederdruck-Dampf kontaktieren	Wirkungsgrad validieren	Hoch
3	Förderprogramme identifizieren (Horizon Europe, GIZ, etc.)	Pilotfinanzierung	Hoch
4	Referenzanlagen besuchen (Si et al., China)	Praxiserfahrung	Mittel
5	Zielmärkte detailliert analysieren (Griechenland, Karibik)	Marktgröße schätzen	Mittel

7.2 Offene Berechnungsaufgaben

#	Aufgabe	Methode	Priorität
1	Pumpenarbeit und Hilfsaggregate ergänzen	Modell erweitern	Hoch
2	Wärmepumpen-Integration detailliert modellieren	COP-Berechnung	Hoch
3	PV-Anlage dimensionieren (inkl. Speicher)	Lastprofil-Simulation	Hoch
4	Membranfläche berechnen (Wärmeübergang)	Wärmeübertragung	Mittel
5	Sensitivität auf Salzgehalt und Recovery	Parameterstudie	Mittel

7.3 Pilotanlagen-Roadmap

4. **Q1 2026:** Detailengineering und Lieferantenauswahl
5. **Q2 2026:** Förderantrag einreichen (Horizon Europe / FFG)
6. **Q3-Q4 2026:** Bau der Pilotanlage (20 m³/Tag)
7. **2027:** Testbetrieb und Optimierung an Pilotstandort
8. **2028:** Serienreife und erste kommerzielle Anlagen

Anhang: Modellparameter

A.1 Sensitivität: Kompressor-Druckdifferenz

Δp [mbar]	T_{cond} [°C]	SEC _{el} [kWh/m ³]	LCOW [\$/m ³]
5	80.3	0.62	1.37
10 (Basis)	80.5	1.23	1.42
15	80.8	1.84	1.47
20	81.0	2.44	1.52
30	81.5	3.63	1.63

Erkenntnis: Kleinere Druckdifferenz = weniger Kompressorarbeit = günstigere LCOW. Aber: Kleinere ΔT über Membran erfordert größere Membranfläche (Trade-off).

A.2 Modell-Einschränkungen

Annahme	Realität	Auswirkung
Membran-Wärmewiderstand = 0	Endlicher Widerstand	SEC _{th} unterschätzt
Kein Fouling/Scaling	Betriebsproblem bei Salzwasser	Wartungskosten unterschätzt
Keine Pumpenarbeit	~0.5 kWh/m ³ zusätzlich	SEC _{el} unterschätzt
Ideale Wärmeintegration	Verluste unvermeidlich	Optimistische Schätzung
Geschätzte CAPEX	Hohe Unsicherheit	±30% möglich

— Ende des Dokuments —