

Aus Abwärme wird Strom

Der Begriff ORC steht für Organic Rankine Cycle und ist der kleine Bruder vom herkömmlichen Dampfkraftwerksprozess. ORC läuft mit einem organischen Kältemittel, welches eine bedeutend tiefere Siedetemperatur aufweist als Wasser. Dies ermöglicht die Stromproduktion aus Industrieabwärme ab Temperaturen von 80 °C und leistet somit einen Beitrag zur Energieeffizienzsteigerung von Industrieanlagen.

Adrian Rettig*

In der chemischen Industrie aber auch in der Lebensmittel-, Papier- und Zementherstellung usw. wird viel Wärme benötigt. Dabei kühlt sich der Wärmeträger im Verlauf des Prozesses auf ein Temperaturniveau ab, bei dem sich die Restwärme für den primären Prozess nicht mehr nutzen lässt. Um eine bessere Ausnutzung der thermischen Energie zu erreichen, setzt man die Restwärme in anderen Prozessen ein, beispielsweise bei der Trocknung von Granulaten. Falls das nicht möglich ist, bietet sich die Umwandlung der Abwärme in elektrische Energie an. Diese kann für den Eigenbedarf genutzt oder leicht ins bestehende Stromnetz eingespeist werden. Der Organic Rankine Cycle (ORC) stellt eine Technologie dar, mit der sich thermische Energie auch bei relativ

niedrigen Temperaturen, im Bereich 80 bis 350 °C, in elektrische Energie umwandeln lässt.

Thermodynamik des herkömmlichen Dampfkraftwerksprozesses

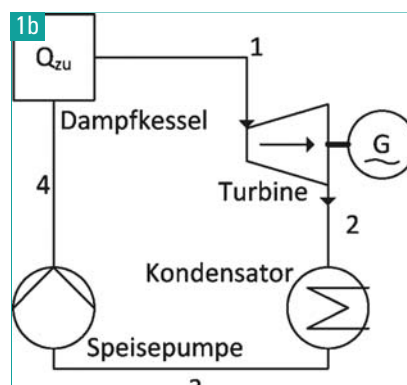
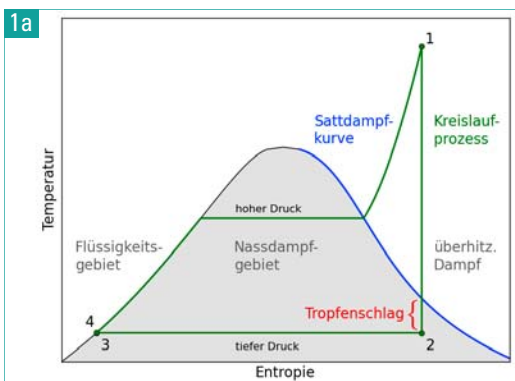
Um den Organic Rankine Cycle besser zu verstehen, wird zunächst der herkömmliche Dampfkraftwerksprozess dargestellt (Abbildung 1). In einem Dampfkraftwerk wird thermische Energie in elektrische Energie umgewandelt, indem Wasser eine Reihe von Zustandsänderungen durchläuft.

Um die nötigen Zustandsänderungen zu realisieren, braucht es die Komponenten Turbine mit Generator, Kondensator, Speisepumpe und Dampfkessel.

Durch Einleiten von überhitztem Dampf bei hohem Druck und hoher Temperatur (Zustandspunkt 1) in die

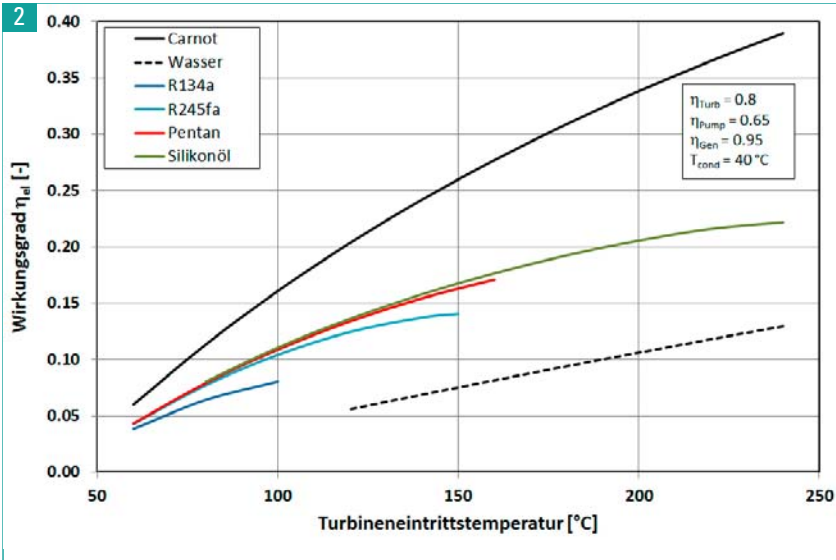
Turbine werden die über den Umfang verteilten Turbinenschaufeln umströmt. Ähnlich wie bei einem Tragflügel eines Flugzeugs erzeugt dies eine Auftriebskraft, welche die Turbinenwelle antreibt und zum Rotieren bringt. Die Rotationsenergie wird durch die Turbinenwelle auf den Generator übertragen, wo sie in elektrische Energie umgewandelt wird. Während die Turbine dem Dampf Energie entzieht, nehmen der Druck und die Temperatur ab. Der Dampf kann sich bereits innerhalb der Turbine so stark abkühlen, dass sich Tropfen bilden (Nassdampfgebiet). Treffen diese auf die Turbinenschaufeln, kann dies die Turbine beschädigen. Damit der Kraftwerksprozess kontinuierlich weiterläuft, muss der kalte Niederdruckdampf (Zustandspunkt 2) am Austritt der Turbine wieder auf den Zustand vor der Turbine gebracht werden, d.h. auf hohen Druck und hohe Temperatur. Dazu wird der Dampf im Kondensator soweit gekühlt, bis nur noch flüssiges Wasser (Zustandspunkt 3) vorhanden ist. Das flüssige Wasser lässt sich nun mithilfe der Speisepumpe mit geringem Energieaufwand auf hohen Druck (Zustandspunkt 4) bringen. Im Dampfkessel wird dem Wasser Wärme zugeführt. Das Wasser erwärmt sich bis zur Siedetemperatur und beginnt dann bei gleichbleibender Temperatur zu verdampfen. Erst wenn alles Wasser verdampft ist, steigt die Temperatur des Dampfes weiter an und wird zu überhitztem Dampf (Zustandspunkt 1). Der überhitzte Dampf strömt wieder in die Turbine, womit der Kreislauf geschlossen ist.

Der Wasserdampfprozess funktioniert sehr gut für Turbineneintrittstemperaturen über 350 °C. Bei bedeutend tiefer liegenden Temperaturen nimmt der Wirkungsgrad stark ab und die Gefahr von turbinenschädlichem Tropfenschlag zu, weil die Expansion bis tief in das Nassdampfgebiet reichen kann



1a: Idealisierter Dampfkraftwerksprozess im T,s-Diagramm.

1b: Anlagenschema eines stark vereinfachten Dampfkraftwerkprozesses.



Carnot- und elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Turbineneintrittstemperatur für unterschiedliche Arbeitsmedien.

(siehe Abbildung 3). Durch Absenken des Turbineneintrittsdrucks kann der Nassdampfgehalt verkleinert aber nicht zum Verschwinden gebracht werden. Durch die Druckabsenkung verschlechtert sich der realisierbare Wirkungsgrad zusätzlich.

Organic Rankine Cycle

Im Unterschied zum herkömmlichen Dampfkraftwerksprozess wird beim Organic Rankine Cycle ein organischer Stoff, zum Beispiel Pentan, anstelle von Wasser als Arbeitsmedium eingesetzt. Organische Arbeitsmedien besitzen tiefere Siedetemperaturen, was für die Nutzung von Abwärme mit Temperaturen unter 350 °C entscheidend ist. Durch die Anpassung des Arbeitsmedi-

ums an eine vorhandene Abwärmetemperatur (z. B. Abwärme eines bestehenden industriellen Prozesses) lassen sich höhere Wirkungsgrade realisieren. Abbildung 2 zeigt die Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Turbineneintrittstemperatur für verschiedene Arbeitsmedien sowie für das theoretische Ideal (Carnot-Prozess). Der Carnot-Prozess beschreibt einen idealen Kreisprozess und zeigt den theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische bzw. elektrische Energie.

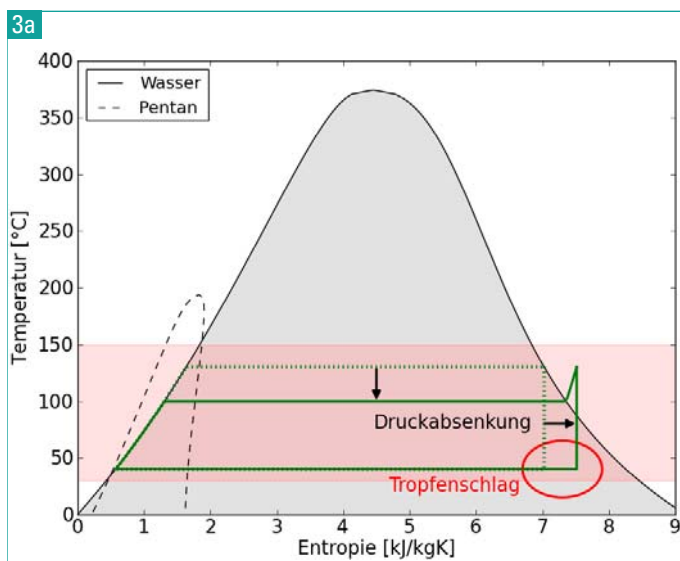
Viele organische Arbeitsmedien besitzen eine «überhängende» Sattdampfkurve (vgl. Abbildung 3 rechts) mit dem Vorteil, dass die Expansion stets im überhitzten und somit trockenen Be-

reich endet. So wird Tropfenschlag ausgeschlossen und ein wartungsarmer Betrieb von ORC-Turbinen sichergestellt.

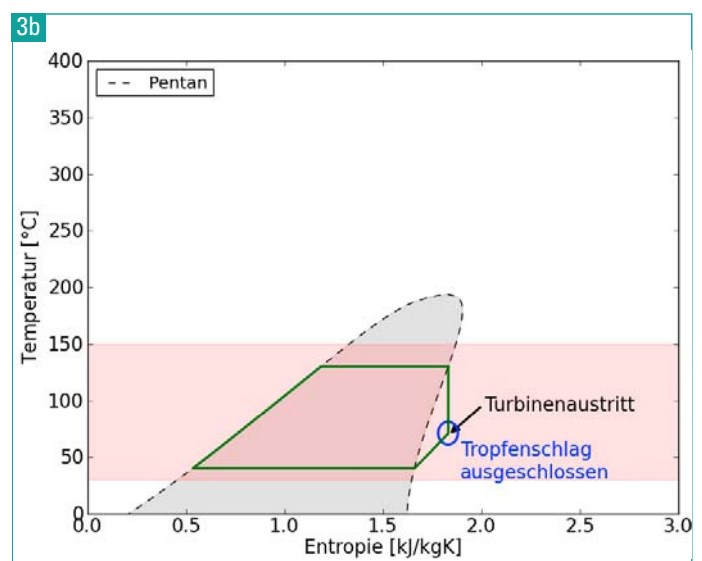
Insgesamt zeichnet sich die ORC-Technik durch seine Robustheit, die kompakte Bauweise, die hohe Automatisierbarkeit und den vergleichsweise hohen Wirkungsgrad aus.

ORC in der Schweiz

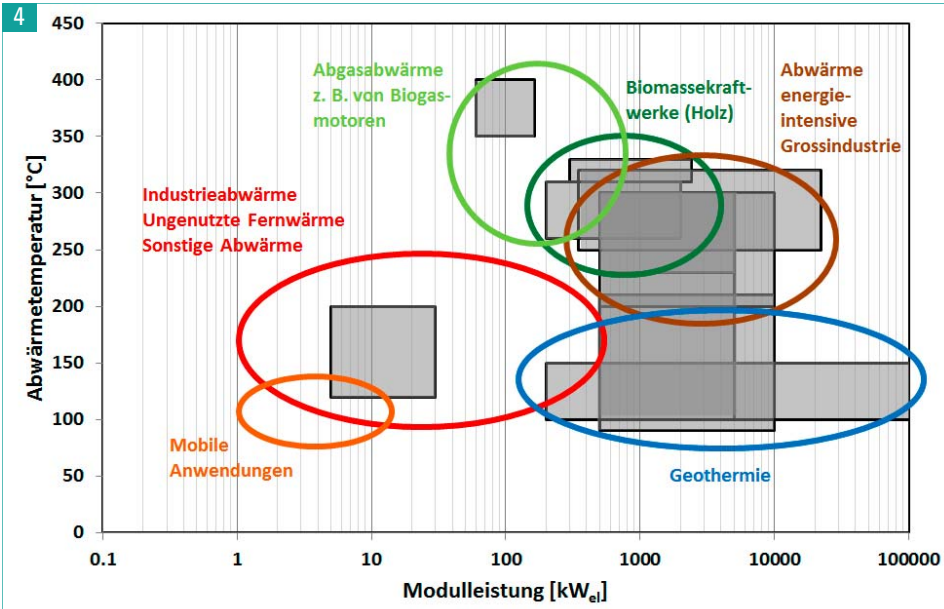
Im Vergleich zu den Nachbarländern Deutschland, Österreich und Italien ist die ORC-Technologie in der Schweiz wenig bekannt und kaum verbreitet. Eine durchgeführte Internetrecherche zeigt, dass es in der Schweiz insgesamt sieben realisierte bzw. sich im Bau befindliche Anlagen gibt. Die meisten ORC-Anlagen werden mit Biomasse als Wärme-Kraft-Kopplungsprozess (WKK) betrieben. Die Nutzung industrieller Abwärme zur Stromproduktion wird jedoch kaum angewendet. Dieses Ungleichgewicht zeigt auch der Vergleich zwischen angebotenen ORC-Modulen verschiedener Anbieter (grau) mit den möglichen Anwendungsfeldern (farbige Bereiche), siehe Abbildung 4. Es existiert eine Anhäufung von angebotenen ORC-Modulen im Temperaturbereich zwischen 200 und 350 °C bei verhältnismässig hohen Leistungen zwischen 200 und 2000 kWel. Mit diesen Abwärmemperaturen lassen sich relativ gute Wirkungsgrade im Bereich von 20 % realisieren. Ausserdem sinken die spezifischen Investitionskosten mit zunehmender Leistung, was zusammen mit speziellen Einspeisevergütungen für Biomasseanlagen den wirtschaftlichen Betrieb begünstigt. Die Abwärme aus



3a: Idealisierter Dampfkraftwerksprozess mit Wasser bei tiefen Temperaturen. Die Tropfenschlaggefahr bleibt auch mit abgesenktem Druck bestehen.



3b: Beim Prozess mit Pentan endet die Expansion im überhitzten und somit trockenen Bereich.



Existierende und potenzielle Anwendungsfelder im Temperatur-Leistungs-Diagramm.

energieintensiven Industrien befindet sich ebenfalls in diesem Bereich und wird in naher Zukunft auch ohne spezielle Einspeisetarife durch ORC-Technologie profitabel nutzbar sein. Der Bereich mit tiefen Leistungen und verhältnismässig tiefen Temperaturen, eher typisch für industrielle Abwärme, wird momentan nur durch einen Anbieter abgedeckt. Der Erfolg dieser Anlagen hängt sehr stark von der künftigen Kostenentwicklung ab. Nachfolgend wird eine grobe Abschätzung der Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit der Modulgrösse gegeben.

Grobe Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung muss fallweise erstellt werden, da sich die Anforderungen je nach Anwendung stark unterscheiden können. An dieser Stelle wird nur eine grobe Abschätzung für die Amortisationszeit und Rentabilität in Abhängigkeit der Modulleistung berechnet. Diese Werte werden von den Investitionskosten beeinflusst, welche wiederum stark von den Modulleistungen abhängen. Je höher die Modulleistung ist, desto geringer fallen die spezifischen Investitionskosten aus (vgl. *Abbildung 5*). Für kleine Leistungsgrös-

sen nehmen sie exponentiell zu. Vergleicht man die Daten mit jenen von Renz, ergeben sich Kostenreduktionen von 30 bis 40 Prozent in den letzten 15 Jahren. Berücksichtigt man den sprunghaften Anstieg der F&E-Aktivitäten in den letzten fünf Jahren, kann aufgrund von Optimierungen, Standardisierungen und Lerneffekten in naher Zukunft mit weiteren Kostensenkungen gerechnet werden. Insbesondere für kleine Leistungsklassen mit vielen Anwendungen sollte mit der Zeit auch ein Skalenvorteil entstehen.

Für die Amortisationszeiten und die Rentabilität sind folgende Annahmen in die Berechnung eingegangen:

- Investitionskosten = Modulleistung mal spez. Investitionskosten gemäss Kostenfunktion; zusätzlicher Fall mit 50 % höheren Investitionskosten, um Unsicherheiten zu berücksichtigen
- Abschreibung über 10 Jahre
- Kalkulatorischer Zinssatz: 10 %
- Jährliche Wartungs- und Versicherungskosten 0,5 bzw. 1 % der Investitionskosten
- Strompreis: 15 Rp./kWh (tiefster Tarif für ein mittleres Unternehmen)
- 8000 Volllaststunden
- Rentabilität, bezogen auf 10 Jahre
- Keine zusätzlichen Energiekosten, da Abwärme als Energiequelle

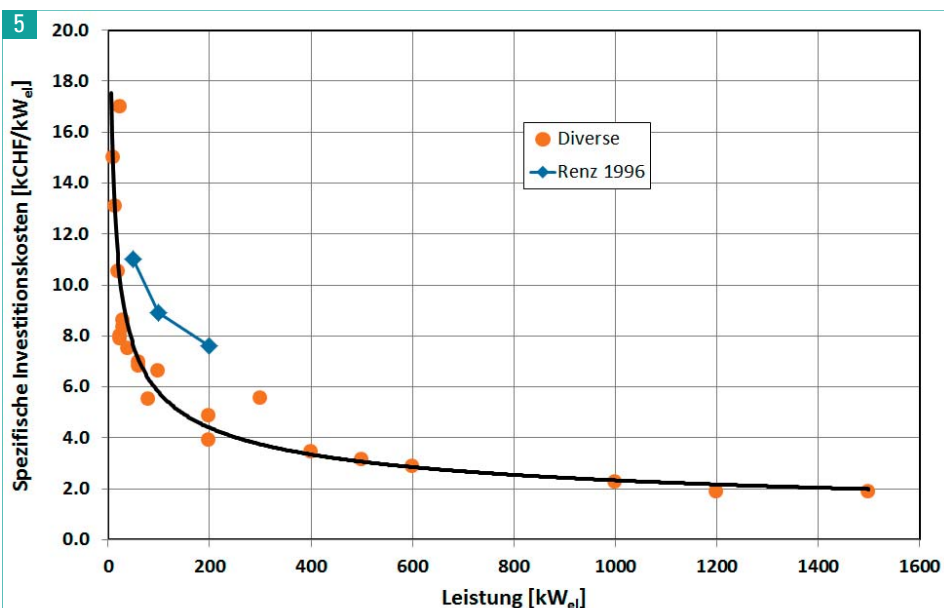
(In der *Abbildung 6* ist das Ergebnis grafisch dargestellt.)

Fazit und Ausblick

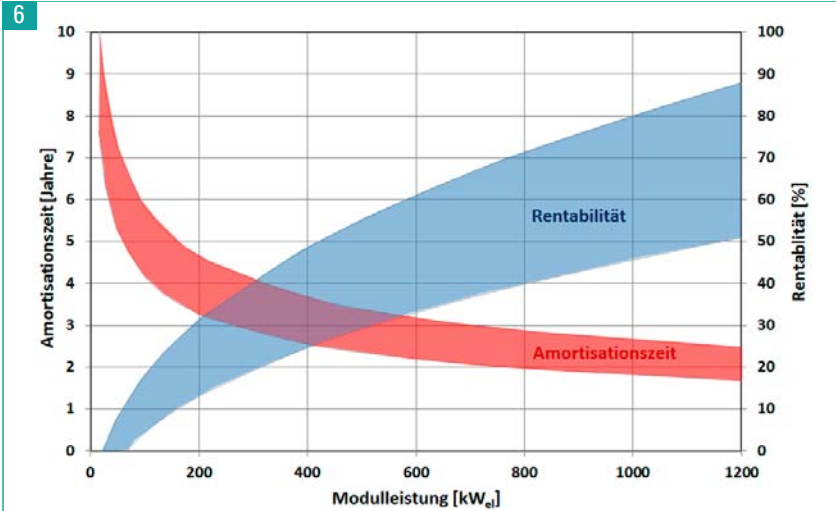
ORC ist mittlerweile eine marktreife Technologie, die für Anlagen über 100 kWel bereits heute vertretbare Amortisationszeiten und eine positive Rentabilität erreichen sollten. Unter den gemachten Annahmen ist für kleinere Anlagen die Wirtschaftlichkeit noch kaum gegeben. Andererseits ist davon auszugehen, dass die Energiepreise in Zukunft steigen werden. Dadurch verbessert sich die Wirtschaftlichkeit auch für kleinere ORC-Systeme. Ausserdem wirkt sich die Vergütung von CO₂-Einsparungen diesbezüglich positiv aus.

Holzbefeuerte ORC-Systeme mit WKK werden sich in der Schweiz in den nächsten Jahren weiter verbreiten. Auch bestehende Anlagen aus dem energieintensiven Industriebereich (z.B. Zementindustrie) werden ORC vermehrt zur Energieeffizienzsteigerung einsetzen.

Ein grosses Potenzial liegt in der industriellen Abwärme bei eher kleinen Wärmemengen und relativ tiefen Temperaturen von 80 bis 120 °C. Die Haupt-



Abgeschätzte Kostenfunktion; der Vergleich mit den spez. Investitionskosten aus dem Jahr 1996 zeigt gegenüber heute eine beachtliche Kostenreduktion (Quellen [1–5]).



Amortisationszeiten und Rentabilität, bezogen auf 10 Jahre in Abhängigkeit der Modulgröße; die untere Grenzkurve der Amortisation ergibt sich mit der abgeschätzten Kostenfunktion, die obere Grenze durch die Kostenfunktion mal den Faktor 1.5.

herausforderung liegt in der Kostensenkung kleiner ORC-Module. Es gibt Anbieter, die diese Herausforderung angehen, jedoch mangelt es momentan an Referenzprojekten. Entsprechende Projekte müssen zeitnah gestartet und wissenschaftlich begleitet werden.

Das Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering der ZHAW sieht in der ORC-Technologie die Möglichkeit, die Energieeffizienz von Industrie-

anlagen signifikant zu verbessern. Wir wollen den Bekanntheitsgrad der ORC-Technologie in der Schweiz steigern, indem wir aktiv Öffentlichkeitsarbeit leisten, in diesem Bereich angewandte F & E-Projekte durchführen und die Thematik in die Ingenieursausbildung integrieren. Ihre Abwärme lässt uns nicht kalt!

www.iefz.zhaw.ch

- [1] D. Depta. Präsentation «Effizienzsteigerung bei der Biogasnutzung – Nutzung der ORC-Technologie bei Blockheizkraftwerken.» Umwelttechnik & Ingenieure GmbH, 2009
- [2] I. Obernberger, F. Biedermann, P. Thonhofer, M. Gaia, R. Bini. Neue Klein-ORC-Technologie (200 kWel) für dezentrale Biomasse-KWK-Anlagen, 2009
- [3] D. Brélaz, P. Meystre. Réalisation d'une installation de micro cogénération pour la piscine de Mon Repos. Services industriels, Sécurité publique et sports Lausanne, 2008
- [4] K.-P. Priebe. Effizienz kleiner ORC-Anlagen – Chancen und Grenzen der Nachverstromung ungenutzter Wärme von BHKWs. Fachbeitrag von ADATURB, 2008
- [5] P. Renz. Stromerzeugung aus Holz mit einer ORC-Anlage. Laboratorium für Energiesysteme ETH Zürich, 1996

*Adrian Rettig, ZHAW, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, Winterthur, adrian.rettig@zhaw.ch

«Der Handliche» EurotestCOMBO MI3125B



Prüfung allstromsensitiver RCD's Typ B
Gut/schlecht Bewertung mit rot/grüner LED-Anzeige
Intuitiv bedienbarer NIV-Tester neuester Generation
Robustes und ergonomisches Gehäuse
Inkl. Software; optional mit SiNA-Messprüfprotokoll

ELKO
SYSTEME AG

Messgeräte • Systeme • Anlagen
 Zur Kontrolle und Optimierung des Verbrauches elektrischer Energie
 Brüelstrasse 47 CH-4312 Magden Telefon 061-845 91 45 Telefax 061-845 91 40
 E-Mail: elko@elko.ch Internet: www.elko.ch

ASTREL

Tel. 055 / 415 66 15
 Fax 055 / 415 66 10

Churerstr. 168, 8808 Pfäffikon SZ e-mail: astrel@swissonline.ch

Lüfteraggregate



Fakt ist:

- Hochleistungs-Lüfteraggregate mit und ohne Vorkammer für Halbleiter-Leistungsmodule
- Miniatur-Lüfteraggregate für Einzelhalbleiterbauelemente
- Standardprogramm mit vielfältigen Varianten
- kundenspezifische Bearbeitung und Sonderausführungen

fischer elektronik

well, well Astrel – well well Astrel