

Dynamische Simulation zur Optimierung komplexer Anlagensysteme

Einleitung

Imtech Deutschland¹ ist das einzige Unternehmen, das komplexe Energieverbundsysteme beliebigen Zuschnitts schon in der Planungsphase dynamisch simulieren kann, um eine Optimierung des Betriebsverhaltens und der Betriebskosten zu erreichen. Bereits in der Projektplanung können diese Systeme energetisch und wirtschaftlich mit belastbaren Daten bewertet werden. Mit HKSim[®] steht Imtech eine hochflexible Modellstruktur zur Verfügung, mit der verschiedenste Anlagenformen auf schnelle Weise grafisch zusammengestellt, simuliert, ausgewertet und gegenübergestellt werden können. Die Erfahrung zeigt, dass die genaue Analyse des dynamischen Betriebsverhaltens mit HKSim[®] gegenüber den gängigen statischen Planungsmethoden Optimierungspotenziale von bis zu 30 % erschließt.

Vor allem das stark wachsende Geschäftsfeld der Imtech-Contracting GmbH & Co. KG nutzt die dynamische Simulation, um betreute Anlagen zu optimieren und Prognosen für die Betriebskosten zu errechnen, um damit untermauerte Garantien für den Kunden abgeben zu können.

Das Tool HKSim[®] erfasst den gesamten Energiehaushalt von Gebäuden oder Liegenschaften und deren Anlagen (Produktionsbetriebe, Industrieanlagen etc.). HKSim[®] ist eine Eigenentwicklung von Imtech Deutschland, koordiniert von der Zentralen Ingenieurtechnik (F+E) in



Dr.-Ing. Jochen Dahm,
Imtech Deutschland GmbH & Co. KG

Hamburg. Die Entwicklung der Modelle wird in Kooperation mit dem AB Technische Thermodynamik der TU Hamburg-Harburg vorgenommen. Zur Anpassung an die Anforderungen der Praxis wurden die Entwicklungsarbeiten mit den Unternehmensbereichen von Imtech und insbesondere mit Imtech-Contracting abgestimmt. Die Zuverlässigkeit der Simulationsrechnungen wurde vom Entwicklungspartner an der TU Hamburg-Harburg geprüft und die Validität durch langjährige – durch Imtech-Contracting gemessene – Anlagendaten bestätigt.

Die Simulationsumgebung

Der modulare Aufbau von Anlagenmodellen aus verschiedenen Einzelmodellen einer Komponentenbibliothek erzeugt die gewünschte hohe Flexibilität zur Abbildung von Systemen beliebigen Zuschnitts. Die objektorientierte Modellierung komplexer Systeme in Form vernetzter Objekte kommt dabei der Vorstellungswelt der anwenden-



Dr.-Ing. Bruno Lüdemann,
Imtech Deutschland GmbH & Co. KG

den Techniker und Ingenieure entgegen. Real vorhandene Elemente einer Anlage – beispielsweise Rohre, Kessel, Pumpen etc. – werden als getrennte wieder verwendbare Softwarebausteine auf übersichtliche und leicht greifbare Art eingebunden. Die Verbindung eines grafischen Abbildes und der Außenverbindungen (Schnittstellen) jeder Einzelkomponente mit den beschreibenden Gleichungen für die physikalischen Bauteileigenschaften ermöglicht die Zusammenstellung beliebig komplexer Systemmodelle am Bildschirm. Das systembeschreibende Differenzial-Algebraische-Gleichungssystem wird aus der Modellgrafik durch die Software automatisch generiert. Für eine sichere Verwaltung der Projektdaten und eine schnelle, effiziente Aufbereitung der erzeugten Simulationsergebnisse wurde eine maßgeschneiderte grafische Oberfläche entwickelt.

Die Modelleigenschaften sind dem Ziel angepasst, Jahressimulationen durchzuführen und Jah-

¹ vormals Rudolf Otto Meyer & Rheinelektrotechnik

resbetriebskosten zu ermitteln, können aber gleichzeitig auch sehr schnelle, durch die individuelle Regelung verursachte Ereignisse abbilden. Die entwickelten Bibliotheken enthalten alle nötigen Bausteine zur Modellierung komplexer Energieanlagen:

- Wärmeerzeuger (Standard, Niedertemperatur- und Brennwertkessel)
- BHKW, Turbinen
- Pumpen
- Wärmeübertrager
- Rohre, Ventile, T-Stücke
- Speicher
- Regler
- Kältemaschinen
- Rückkühler (offene Kühltürme, Trockenkühler)
- Thermische Verbraucher (Wärme, Kälte, Brauchwasser)
- Zähler (Verbrauchsbilanzierung Strom, Gas, Öl, Wasser)



Abbildung 1: Kühlturmanlage der zentralen Kälteversorgung.

Anlagenoptimierung am Beispiel eines Kälteverbundsystems

Imtech Contracting analysierte im Jahre 2003 die zentrale Kälteversorgungsanlage der DSK Anthrazit Ibbenbüren GmbH. Die DSK Anthrazit baut Anthrazit-Kohle in einer Tiefe von über 1.500 m ab. Dabei entstehen hohe Wärmelasten, die alleine durch die Bewetterung der Grube nicht abgeführt werden können. Um ein akzeptables Arbeitsklima zu gewährleisten, kühlen Streckenkühlergeräte unter Tage lokale Arbeitsbereiche vor Ort. Zusätzlich wird bei hohen Außentemperaturen das einziehende Wetter vorgekühlt. Insgesamt stehen zur Kühlung 10 MW Kälte-Nennleistung, aufgeteilt auf 4 Kälteerzeuger, zur Verfügung. Der Betrieb ist durch eine sehr hohe Volllaststundenzahl von ca. 6.400 h/a und einem Jahres-Kältebedarf von 64.000 MWh gekennzeichnet.

Die **Zielsetzung** der Anlagenoptimierung war eine Kostenreduzierung bei der Kälteerzeugung. Die **Methodik** entsprach dabei einer ganzheitlichen Vorgehensweise, bei der das Zusammenspiel der Hauptkomponenten der An-

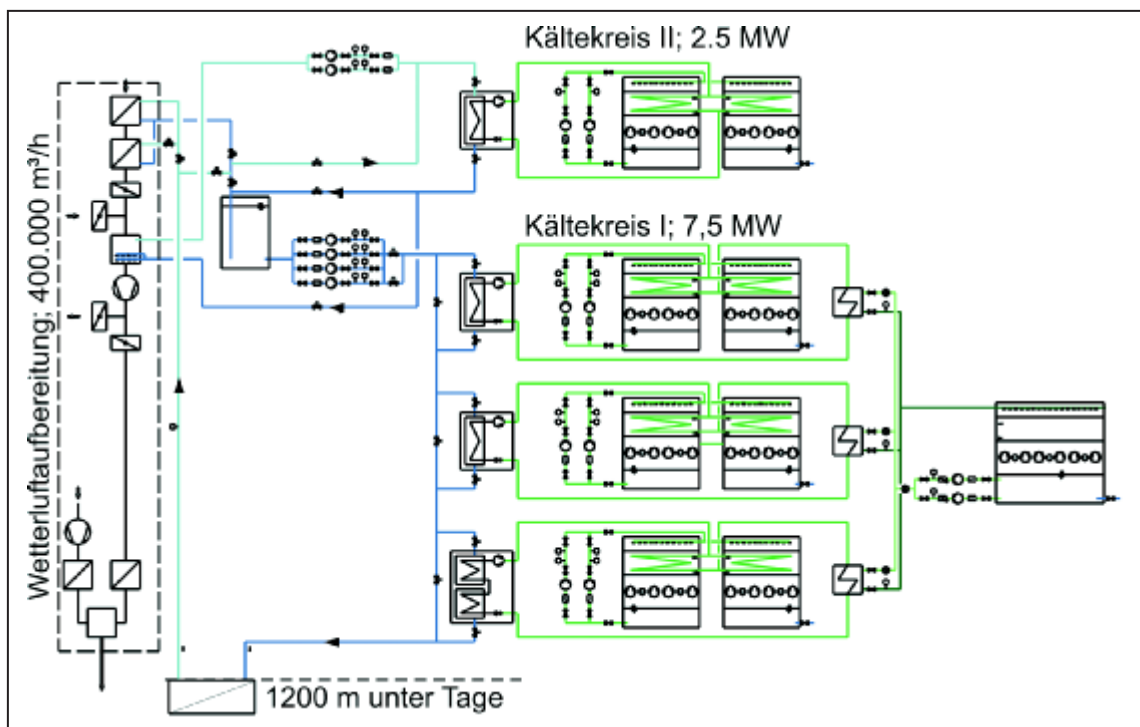


Abbildung 2: Prinzip des untersuchten Kälteverbundsystems.

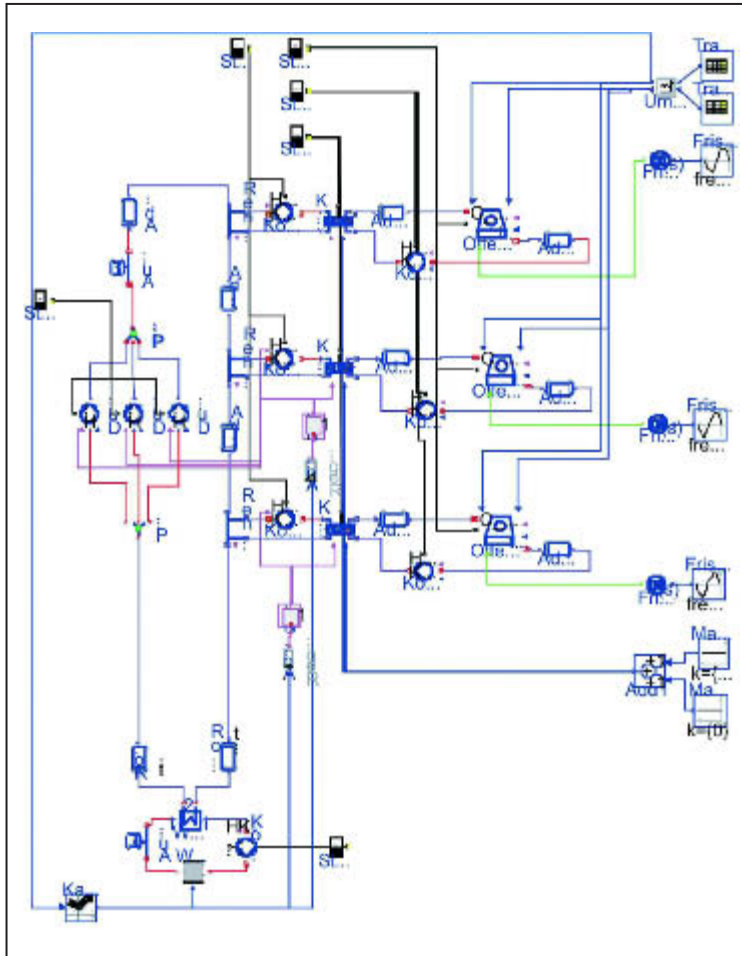


Abbildung 3: Simulationsmodell für den Ist-Zustand am Beispiel des Kältekreis I.

lage berücksichtigt wurde. Diese Art der Vorgehensweise kann mit der von Imtech Deutschland entwickelten Simulationsumgebung HK-Sim® leicht realisiert werden.

Modellierung der Kälteversorgung

Als Grundlage für die Optimierung wurde die im Betrieb befindliche Anlage im ersten Schritt nachmodelliert und das Modell an Messdaten kalibriert. Damit konnte zunächst der Ist-Zustand der Anlage detailliert aufgenommen und analysiert werden. Der schematische Aufbau des untersuchten Kälteverbundsystems ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Anlage besteht aus zwei koppelbaren Kältekreisen. Der **Kältekreis I** beinhaltet drei Kälteerzeuger á 2.5 MW Nennleistung, die in Reihe geschaltet die Kaltwasserversorgung für unter

Tage übernehmen. Jeder dieser Kälteerzeuger ist mit einem eigenen Verdunstungskondensator ausgerüstet. Ein separater Kühlturm übernimmt zusätzlich die Nachkühlung bei allen drei Anlagen im Spitzenlastbetrieb. **Kältekreis II** kann zur Kühlung des Zuluftstromes eingesetzt werden. Der vorbehandelte einziehende Wettervolumenstrom beträgt in etwa 400 000 m³/h. Zur Kühlung des einziehenden Wetters steht eine Kältemaschine mit 2.5 MW Nennleistung bereit. Die Erwärmung der Zuluft an kalten Tagen wird durch Rückgewinnung der Wärme aus Kältekreis I unterstützt. Die Wärmetauscher der Wärmerückgewinnung haben eine Leistung von ca. 2.3 MW bei einer Außentemperatur von -10°C. Die **Regelung** der Anlagen geschieht teils automatisch, teils manuell. Automatisiert ist z.B. die Regelung jeder einzelnen Kältemaschine und des zugehö-

rigen Kühlturms entsprechend der vorgegebenen Vorlauftemperatur. Die im Kältekreis I in Serie geschalteten drei Kältemaschinen werden in der Regel per Hand entsprechend der steigenden Last zugeschaltet. Elektrische Hauptverbraucher in den Kältekreisen stellen die vier Kältemaschinen, die vier Netzpumpen, die vier Verdunstungskondensatoren und der Zuluftventilator der Schachtlüftung dar.

Die Lastsituation des Grubenbetriebes ist von der ständigen Grundlast der Bergwärme gekennzeichnet. Unter 0°C Außentemperatur beträgt die Grundlast im Mittel ca. 4.5 MW, die einziehenden Wetter werden beheizt, um ein Einfrieren des Schachtes zu vermeiden. Mit steigender Außentemperatur von 0°C bis ca. 12°C erhöht sich die Last auf ca. 7.5 MW. In diesem Intervall wird das einziehende Wetter weder gekühlt noch beheizt. Bei Überschreiten von 12°C beträgt die Last in etwa 7.5 MW. Die einziehende Luft wird zunächst befeuchtet und ab 15°C zusätzlich gekühlt (1.5 – 2 MW Kälteleistung). Aus den gemessenen Daten wurde ein Lastprofil erstellt. Der linearisierte Verlauf der Lastmessungen wurde als Randbedingung für die Simulation vorgegeben. Die Leistungsdaten der Modelle für die Kältemaschinen, alle mit Schraubenverdichtern ausgerüstet, der Netzpumpen und der Verdunstungskondensatoren wurden entsprechend an gemessene Leistungscharakteristiken und Herstellerangaben angepasst.

Mit den kalibrierten Hauptkomponenten und Implementierung der aktuellen Regelung wurde unter Berücksichtigung des Testreferenzwetters der Zone 3 des Deutschen Wetterdienstes der Energiebedarf der Kälteerzeugung für den Zeitraum von einem Jahr simuliert. Das Ergebnis ist in Tabelle 1 für die Kältekreise der Anlage dargestellt. In der Darstellung ist das simulierte Ergebnis (Referenzmodell) der Bilanz des Jahres

Tabelle 1: Simulationsergebnis des Ist-Zustandes (Referenzmodell), Jahresbilanz 2002.

Name	Erzeugte Kälte MWh/a	Strom Kühlkreis- lauf I MWh/a	Strom Kühlkreis- lauf II* MWh/a	Strom Summe MWh/a	Gesamtkosten Euro/a
Referenzmodell	63.711	16.258	1.814	18.072	831.308
Gemessene Jahresbilanz 2002	X	X	X	17.500	840.000

* Inklusive Wetterluftaufbereitung.

2002 gegenübergestellt. Die Bilanz des Jahres 2002 weist einen geringeren Stromverbrauch und höhere Jahresgesamtkosten als das Simulationsergebnis aus. Als Gründe für die Abweichung sind u. a. verschiedene Wettervoraussetzungen, ein in der Simulation nicht berücksichtigter, an manchen Wochenenden reduzierter Kältebetrieb und unterschiedliche Kostenansätze bei der Berechnung der Gesamtkosten zu nennen. Insgesamt ist die Abweichung beim Strombedarf mit 2,5 % gering, so dass das Simulationsmodell damit als kalibriert betrachtet wird.

Optimierung

Ausgehend vom Referenzmodell wurden verschiedene Optimierungsmaßnahmen in das Anlagenmodell eingefügt und der Jahresstromverbrauch erneut berechnet. Bei der Wahl der Maßnahmen wurde im Hinblick auf das Contracting besonders auf deren Realisierbarkeit geachtet. Insgesamt wurden sechs erfolgversprechende Optimierungsvarianten betrachtet:

- Ausrüstung der Verdunstungskondensatoren mit **Frequenzumformer**: Die FU-Regelung verspricht einen niedrigeren Stromverbrauch als bei der Klappenregelung der Verdunstungskondensator-Ventilatoren im Teillastbereich.
- Ausrüstung der Kühlturmventilatoren mit **Zweistufenregelung**: Die Klappenregelung der Kühlturmventilatoren wird durch den zweistufigen Betrieb der Ventilatoren ersetzt. Im zweistufigen Betrieb trägt die Ventilatorleistung in

der ersten Stufe 50 % und in der zweiten Stufe 100 %.

- **Wochenendabschaltung einer Kältemaschine** und Anheben der Vorlauftemperatur: Die Wochenendabschaltung einer Kältemaschine und einer Netzpumpe beinhaltet die Abschaltung des letzten in Serie geschalteten Kälteerzeugers. Zusätzlich wird die Soll-Vorlauftemperatur auf 5 °C angehoben. Der Vorteil dieser Betriebsweise ist ein höheres Kaltwasser-Temperaturniveau der zwei in Betrieb befindlichen Kältemaschinen mit daraus resultierendem günstigeren Betriebspunkt und niedrigerem Stromverbrauch.

- Ausnutzen von **freier Kühlung** aus Kältekreis II: Diese Maßnahme beinhaltet eine verstärkte Ausnutzung der freien

Kühlung mit Hilfe der Wetterluftaufbereitung aus Kältekreis II. Durch Vertauschen der Einbausituation des Sprühkühlers mit dem Wärmetauscher kann durch reinen Sprühbetrieb die Außentemperatur zusätzlich durch Ausnutzen der Verdunstungswärme gesenkt werden. Eine niedrigere Luft-Eintrittstemperatur in den Wärmetauscher der Wärmeauskopplung hat dann eine bessere Vorkühlung im Kältekreis I zur Folge.

- **Kombination** der Maßnahmen **Zweistufenregelung** und auf ein reales Maß reduzierte **Wochenendabschaltung** (an 16 Wochenenden).

- Absenken der **Kondensatortemperatur**: Die Kondensatortemperatur wurde bei der Kombivariante schrittweise von 30 °C auf 26 °C gesenkt.

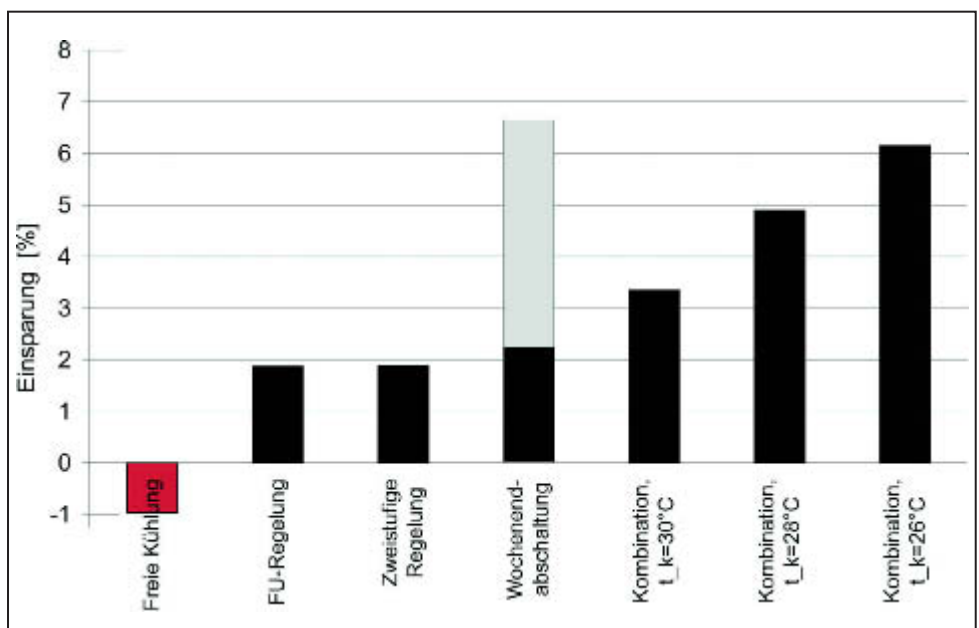


Abbildung 4: Jährliche Einsparung verschiedener Optimierungsvarianten.

Rot: Mehrausgaben; Schwarz: realistisch umsetzbare Maßnahmen; Grau: aus betrieblichen Gründen nicht realisierbares Potenzial.

Ein Absenken der Kondensatortemperatur bewirkt den Betrieb der Kältemaschinen bei verbesserter Leistungsziffer, führt jedoch gleichzeitig zu erhöhtem Stromverbrauch der Verdunstungskondensator-Ventilatoren.

Das Resultat der Optimierung ist als jährliche Einsparung für die einzelnen Maßnahmen in Abbildung 4 dargestellt. Die maximale Einsparung bei Umsetzung der Maßnahmen Zweistufenregelung und Absenkung der Kondensatortemperatur in Kombination mit der reduzierten Wochenendabschaltung beträgt in etwa 6 % (51.000 €/a) der jährlichen Stromkosten.

Interessant ist das negative Ergebnis der erweiterten Nutzung der freien Kühlung. Der positive Beitrag der freien Kühlung wurde durch das nachfolgend niedrigere Temperaturniveau der Kälteerzeugung überkompensiert.

Auffällig ist die ähnliche Einsparung bei FU- oder Zweistufenbetrieb der Verdunstungskondensator-Ventilatoren. Das vergleichsweise schlechte Abschneiden des FU gegenüber der Zweistufenregelung lässt sich mit der hohen Vollaststundenzahl und entsprechend wenig Teillastbetrieb bei der Kälteerzeugung begründen. Eine detaillierte, zeitlich hochaufgelöste Analyse der Betriebszustände konnte ausgezeichnet mit der Simulationssoftware HK-Sim[®] durchgeführt werden.

Als Ergebnis der Optimierung mit HKSim[®] konnte folgende Vorgehensweise zur Umsetzung vorgeschlagen werden: Im ersten Schritt sollte zunächst die Wochenendabschaltung eines Kälteerzeugers mit sehr geringen Kosten möglichst häufig umgesetzt und die Kondensationstemperatur so weit wie möglich abgesenkt werden. Nach Information des Kälteanlagenherstellers werden 26°C als minimal mögliche Kondensatortemperatur angesehen. Weiterhin sollte die ohnehin als sanierungsbedürftig

geltende Klappenregelung der Kühlturmventilatoren kurzfristig durch eine Zweistufen-Ventilatorsteuerung ersetzt werden.

Fazit

Das geschilderte Beispiel verdeutlicht, dass der Einsatz eines flexiblen Simulationswerkzeuges wie HKSim[®] zu einem tieferen Verständnis der zeitlichen Abläufe in komplexen Energieanlagen führt. Dieses Know-how wird von Imtech Deutschland im Interesse der Kunden sowohl im Anlagenbau für ein optimiertes Anlagendesign als auch in der Rolle als Betreiber im Contracting und Facility Management für eine möglichst kostengünstige Betriebsweise genutzt.

HKSim[®] erweist sich als äußerst kraftvolles Werkzeug mit dem der beispielhaft vorgestellte Kälteverbund zuverlässig optimiert werden konnte. Das Ergebnis dieser Studie übertraf die Erwartung in puncto Stromeinsparung bei weitem: Die Kombination ausgewählter Maßnahmen ergab eine maximale jährliche Einsparung der Stromkosten von über 51.000 € als kurzfristig realisierbares Potenzial bei sehr geringem Investitionsaufwand. Mit der Umsetzung der Maßnahmen wurde schon in 2004 im Anschluss an die Untersuchungen begonnen. Als weitere ausgewählte Referenzen für den Einsatz von HKSim[®] in 2003 und 2004 sind z.B. Produktionsstandorte von Zeiss-SMT, Oberkochen, dem Pharmaunternehmen BBraun in Melsungen, oder der Nestle Chokoladenwerke in Hamburg zu nennen. ◀

Literatur

- [1] St. Wischhusen; B. Lüdemann; G. Schmitz:
Economical Analysis of Complex Heating and Cooling Systems with the Simulation Tool HKSim
Tagungsband der 3. Int. Modelica-Konferenz, Modelica Association, Linköping, 2003.
<http://www.modelica.org/conference2003/papers.shtml>
- [2] St. Wischhusen; G. Schmitz:
Einsatz eines dynamischen Simulationswerkzeuges zur wirtschaftlichen und energetischen Planung einer komplexen industriellen Energieversorgungsanlage
Tagungsband der VDI Gesellschaft Energietechnik „Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung 2003“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.

5 JAHRE
GARANTIE

DELTA MESS
Wasserzähler - Wärmezähler

Erfolgreich Energie sparen mit Wasser- und Wärmezählern von DELTAMESS.

Serienmäßig funkvorbereitet,
Absperreinheiten integriert,
ca. 30% weniger Druckverlust.



funkvorbereitet

DELTAMESS DWWF GmbH · Sebenter Weg 42 · D-23758 Oldenburg/Holstein
Tel. 04361/51 14-0 · Fax 04361/51 14-88 · e-mail: service@deltamess.de · www.deltamess.de