



INDUSTRIELLE UND VERFAHRENSTECHNISCHE PROZESSE VTP

Überblicksbericht zum Forschungsprogramm 2005

Martin Stettler, BFE

martin.stettler@bfe.admin.ch



Quelle: Ciba/ETHZ

Reaktor für Pigment-Herstellung

In den Reaktoren der Spezialitäten-Chemie werden unterschiedlichste Produkte im Batch-Verfahren hergestellt. Entsprechend unterschiedlich ist der Energiebedarf. Gelingt es, auf Basis der Produktionsdaten (z.B. Betriebsvorschrift) den Energiebedarf für die Herstellung der Produkte mit entsprechenden Prozessmodellen genügend verlässlich vorauszubestimmen, kann die Spezialitätenchemie künftig energieeffizienter produzieren und die Energiekosten für diese Produkte senken.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nach den Sektoren Verkehr und Haushalte ist der Sektor Industrie mit 20% des gesamtschweizerischen Endenergieverbrauchs der drittgrösste Energieverbraucher. Bei industriellen, verfahrenstechnischen Prozessen kann von einem Sparpotenzial von mindestens 20% ausgegangen werden. Das Programm erarbeitet Methoden und Werkzeuge zur Steigerung der Energieeffizienz und Integration von erneuerbaren Energien in industriellen, verfahrenstechnischen Prozessen und deren Infrastruktur. Auf Basis des *Konzepts der Energieforschung des Bundes* und einer punktuellen Branchenbefragung wurden folgende drei Programmschwerpunkte für die Periode 2004-07 abgeleitet:

- **Prozessintegration / Prozessoptimierung**
- **Verbesserung komplexer Produktionsverfahren**
- **Effizientere Trocknungsverfahren**
- **Nachhaltiger Umgang mit Energie und Ressourcen**

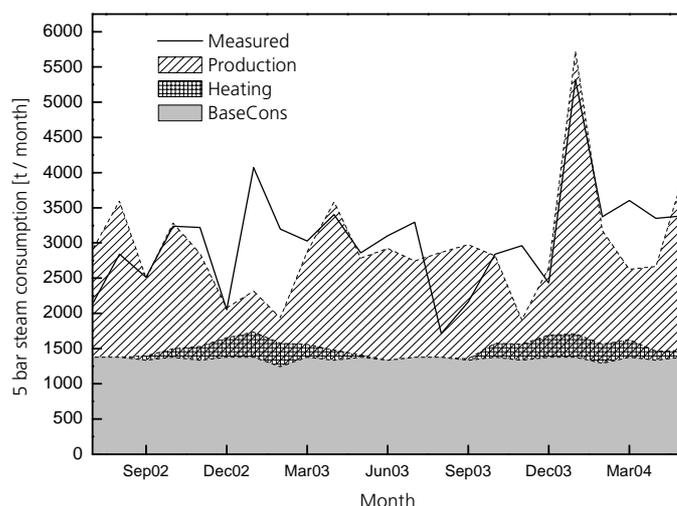
Im Berichtsjahr lagen die **Programmschwerpunkte** bei der **Prozessintegration/ Prozessoptimierung komplexer Prozesse sowie der Effizienz in Trocknungsprozessen**. Eine wichtige Aktivität im Berichtsjahr war die Bekanntmachung des Programms mit seinen Möglichkeiten in der Industrie.

In der Industrie sind thermische Prozesse in der Regel auf Qualität optimiert, hingegen ist die Energieeffizienz dieser Prozesse unbekannt. Dies will die Industrie offenbar nun angehen, es ist eine erhöhte Nachfrage für **Prozessanalysen** und **Prozesssimulationen** (Modellierung) festzustellen. Die **Möglichkeiten und Grenzen der Integration von erneuerbaren Energien in bestehende Prozessketten** ist ein weiterer Punkt, der die energieintensive Industrie im stärker beschäftigt. Ein gemeinsamer Workshop (voraussichtlich 04.06) mit der EnAW mit Industrievertretern, Vertreter aus Bildung und Wissenschaft wird u.a. einen Input betreffend der neuen Forschungsschwerpunkte und -ziele für die nächsten vier Jahre liefern.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

PROZESSINTEGRATION UND -OPTIMIERUNG

Das Projekt **Modeling and Optimization of Energy Consumption in Multipurpose Batch Plants** [1] hat zum Ziel, mit geeigneten Modellen (Top-down und Bottom-up) ein verlässliches Vorhersage- und Optimierungsinstrument für den Energiebedarf chemischer Mehrprodukte-Batchbetriebe zu entwickeln. Leitziel ist es, den produktspezifischen Energiebedarf (Elektrizität, thermische Energie) aufgrund der jeweiligen Produktprozessdaten (Betriebsvorschrift) zu schaffen.



Figur 1: Dampfverbrauch - Vergleich zwischen Messung und Modellierung für eine Vorhersage über 23 Monate – Korrelation 0,56

Im Berichtsjahr wurde das Modellierungstool für den Bottom-Up-Ansatz auf eine neue technische Grundlage (Matlab) gestellt. Damit konnte auch die Verwaltung der verschiedenen Daten sowie die Dateneingabe mittels automatischer Einlesung der Produktionsdaten ins Modellierungsprogramm verbessert werden. Mit einem neuen Modell wurde versucht, mit Hilfe der multivariaten Statistik den Energiebedarf pro Produkt aus dem Gesamtverbrauch eines Energieträgers abzuleiten. Dieser Ansatz

brachte jedoch keine Verbesserung der Resultate (Fig. 1). Einen ersten Hinweis auf ungenügende Energieeffizienz gibt der relativ hohe Dampf-Grundverbrauch (Stand by), welcher von der Produktion weitgehend unabhängig ist. Die Top-Down Modellierung des Elektrizitätsverbrauchs zeigt ähnlich divergierende Resultate (Korrelation 0,54). Allerdings gilt zu bemerken, dass während der Messperiode über 40 verschiedene Produkte hergestellt wurden. Damit handelt es sich um ein komplexes, sich dauernd veränderndes System. Mit zusätzlichen Messungen von weiteren Dampf- und Stromverbrauchern sollen die Modelle noch deutlich verbessert werden.

Das Forschungsprojekt **Efficient Energy Conversion in the Pulp and Paper Industry, EECPI** [2] fügt sich mit einer Fallstudie in das internationale Projekt *Novel Technologies für Energy Efficiency an Eco-Industrial Clusters in the pulp and Paper Industry, E³PAP* ein. Die schweizerischen Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die energieintensiven Prozesse der Lignin- und Celluloseherstellung am Beispiel Borregaard. Die verwendete Methode ermöglicht speziell bei komplexen verfahrenstechnischen Prozessen, durch Prozessintegration Energie- und Wassersparpotenziale zu identifizieren und daraus Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion der CO₂-Intensität abzuleiten und einem ökonomischen Nutzen gegenüber zu stellen.



Figur 2: Abgasreinigungsanlage Borregaard

Der Schwerpunkt der Aktivitäten im ersten Berichtsjahr lag auf der Erfassung der technischen und chemischen Prozesse und deren Energieversorgung sowie der Sammlung und Analyse von Messwerten und Daten. Diese Daten wurden einer Plausibilisierung unterzogen und wo nötig korrigiert. Es wurden die Biomasse-Prozesse (Holz, Fasern, Lignin) thermodynamisch modelliert und bilanziert. Erste Indikatoren zur Beurteilung des Energiebedarfs und der Energieeffizienz konnten für die Dampferzeugung und Dampf-Verbraucher gefunden werden. Einer der wichtigsten ist die Rückgewinnungsrate des Dampfkondensats, welche heute bei rund 31% liegt. Als Folge wurden die Prozessbereiche identifiziert, für die sich eine Kondensatrückgewinnung lohnen würde. Das Rückgewinnungspotenzial liegt bei ca. 80 t/h Kondensat, was einem Sparpotenzial von 60 MW Wärmeleistung entspricht. Die konsequente, Kondensatrückgewinnung und -Nutzung ist also eine grundlegende Massnahme bei Dampfnetzen. Damit der minimal nötige Energiebedarf der thermischen Prozesse ermittelt werden kann, ist die EPFL daran, sämtliche warme und kalte Ströme der relevanten Prozesse zu erfassen und ins Prozess-Modell aufzunehmen. Die Prozessmodellierung erfolgt mittels der Software *Belsim*. Auf Basis dieser Ergebnisse und der effektiven Prozessdaten, wird dann eine gezielte Optimierungsstrategie abgeleitet werden können.

Das Projekt **HORTISOL – Energetische Prozessintegration in Gewächshauskulturen** [3] hat zum Ziel, eine Software zu entwickeln, mit der die wachstumsrelevanten Vorgänge (Prozesse) in einem Produktionsgewächshaus simuliert werden können. Geplant ist ein Werkzeug, mit dem die klimatische Umgebung simuliert respektive optimiert werden kann und letztlich den Schlüssel zur Rentabilität lie-

fern wird. Auf Basis der photosynthetisch aktiven Strahlung, dem CO₂-Gehalt der Innenluft und der Temperatur können mit der Software *HORTISOL* entsprechende Klimastrategien abgeleitet werden, die letztlich zu optimierten Jahreskosten (Investitions-, Energie- und Betriebskosten), höherem Gewinn durch einen früheren Ertrag und hoher Produktivität führen.

Im Berichtsjahr konnten alle fünf Prozesse eines Gewächshausproduktionssystems Pflanzenwachstum, Feuchte, Helligkeit, Temperatur und CO₂ modelliert werden. Vorderhand beschränkt sich das Modell auf die Tomatenpflanze, welche z.Z. vereinfacht durch eine Kultursaison modelliert ist. Noch unklar ist die Verteilung (Planzenteile) der laufend produzierten Glukose im Wachstumsprozess. Mit dem Aufbau einer Gewächshaus-Datenbank, welche konkrete Messungen und Produktionsdaten aus der Praxis umfasst, sollen in einer späteren Phase die Modelle optimiert und die Aussagekraft der Simulation praxistauglich gemacht werden.

VERBESSERUNG KOMPLEXER PRODUKTIONSVERFAHREN

Leitziel des Projekts ***Steigerung der Energieeffizienz in der Backstein-Produktion*** [4] ist die Erarbeitung eines für die Schweizer Backsteinindustrie einsetzbares computergestütztes Prozessoptimierungstool. Dieses soll letztlich eine Prozessführung nach dem minimal möglichen Energieeinsatz bei gleich bleibender Qualität ermöglichen, unter Berücksichtigung der relevanten Einflussparameter für Produktion und anlagespezifischen Gegebenheiten. Dabei steht die Optimierung bestehender Anlagen im Zentrum. Die Backsteinproduktion ist sehr energieintensiv und der Wärmebedarf wird primär mit fossilen Energieträgern (Erdgas) gedeckt.

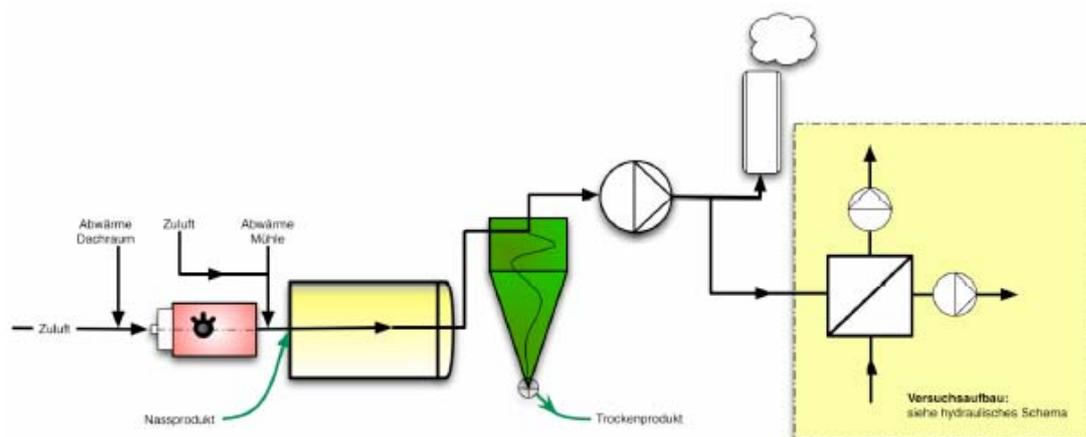
Im Berichtsjahr wurden anhand der *Ziegelei Fisibach AG* in einem ersten Projektschritt die Energie-Benchmarks bestimmt und mit der Literatur verglichen. Im Rahmen der Prozessanalyse der Produktionsanlagen wurden zudem umfangreiche Messungen (FH-Semesterarbeit) mit dem Ziel, zu- und abgehenden Massen- und Energieströme in den Teilsystemen Tunnelofen und Trockner zu bestimmen, durchgeführt. Die bisherigen Arbeiten brachten folgende Erkenntnisse:

- Die energetische Optimierung muss im Tunnelofen ansetzen und nicht bei der Trocknung
- Die Brennkurve (Temperaturniveau in den Ofenzonen) kann optimiert werden, wenn das Rohmaterial in gleichmässiger und bekannter Zusammensetzung zugeführt wird
- Die im Trockner benötigte Wärme kann unter optimalen Verhältnissen nahezu vollständig mit Abwärme aus dem Tunnelofen gedeckt werden
- Anlagen sollten entweder auf Volllast oder auf Teillast optimiert werden (möglichst keine Mischbetrieb)

Für die wissenschaftlich seriöse Entwicklung eines brauchbaren Prozesssimulationstools müssten noch erhebliche Vorarbeiten geleistet werden, welche den Rahmen dieses Projekts sprengen. Die Ursache liegt in der Komplexität der thermischen Prozesse. Die weiteren Projektarbeiten auf die Sicherung der bisherigen Erkenntnisse sowie deren Dokumentation:

EFFIZIENTERE TROCKNUNGSVERFAHREN

Das Projekt ***Neue Verfahren zur Effizienzverbesserung in Trocknungsanlagen*** [5] hatte zum Ziel, neue technologische Verfahren zur Effizienzsteigerung bei der künstlichen Trocknung (Mais, Gras) zu identifizieren und zu überprüfen.



Figur 3: Darstellung der Versuchsanordnung in der TA Willisau

Der Hauptanteil der von der Anlage abfließenden Wärmeströme macht die **Verdampfungs-Entalpie des Wasserdampfs** mit **rund 71%** in der Abluft aus. Die Wärmeleistung einer durchschnittlichen Trocknungsanlage liegt bei rund 4 MW. Heute werden nur etwa 5% des Wärmeinputs (meist durch Öl oder Gas) durch Brüden-Rückführung zurück gewonnen. Idee der Forschungsarbeit war, den Wasserdampf im Abgas mittel Platten-WT zu kondensieren und damit die WRG auf 10 - 20% zu verbessern, was knapp erreicht wurde (siehe Variante 3 unten). Die Wärmeübertragungsleistung während der Versuche lag im Mittel bei 36 kW und mittleren Volumenstrom von 5'000 m³/h. Ein wesentlicher Punkt der Versuchsreihe war auch die Frage, wie sich der Platten-WT betreffend Betriebsverhalten und Verschmutzung verhalten würde. An Stelle eines Filters wurde ein Düsenstock eingebaut, der die WT-Oberfläche abluftseitig mit Wasser besprühte, ohne periodische Besprühung würde der WT auf Grund der zunehmenden Verschmutzung verschliessen. Mit einem periodischen Betrieb des Düsenstocks (10 min. ein, 20 min. aus = 300 l/h) konnte eine kontinuierliche Verschmutzung verhindert werden und so eine gute Wärmeübertragung garantieren werden. Die ökologische und betriebswirtschaftliche Seite des damit verbundenen Wasserverbrauchs müsste bei der Weiterverfolgung dieses Ansatzes geprüft werden.



Figur 4: Versuchsaufbau

Zur Frage der **Verwendung der zurück gewonnenen Wärme** wurden bewusst nur innerbetriebliche Varianten untersucht, da die Anlagen meist in ländlicher Gegend stehen und sich keine geeigneten Wärmeabnehmer in der Nähe befinden. Es wurden **drei Nutzungs-Varianten untersucht:**

Variante 1: Vorwärmung der Prozessluft durch Auskoppelung der Abluftwärme steht in direkter Konkurrenz zu anderen Abwärmequellen, wie Abwärme der Produktionshalle, Mühlen, die technisch einfacher und kostengünstiger genutzt werden können.

Variante 2: Vortrocknung der Prozessluft, d.h. die Ausfällung des in der Zuluft enthaltenen Wassers mittels einer Absorptionskältemaschine (*DryKor-Anlage*, mit ausgekoppelter Abluftwärme) bringt lediglich eine Reduktion des Wärmeinputs von 2%. Zudem sind die Frage der Regulierbarkeit, Anfahrverhalten und Betriebsstabilität heute noch offen.

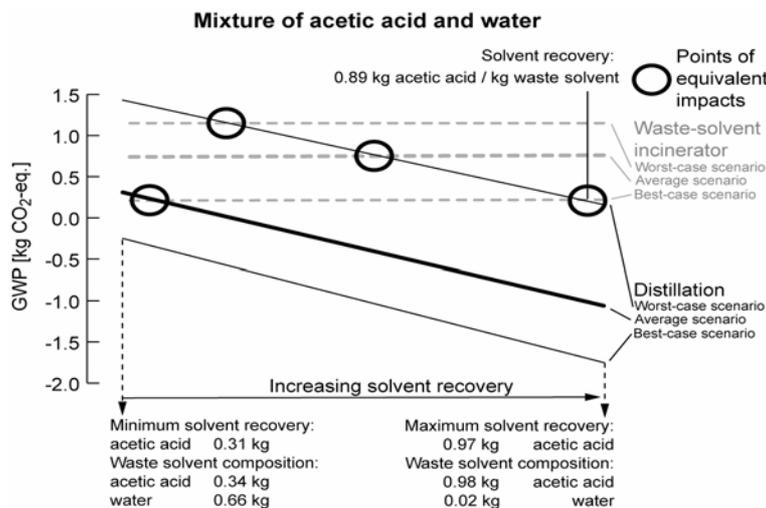
Variante 3: Vortrocknung des Trocknungsgutes mittels eines vorgelagerten Bandrockners bringt für sich eine Reduktion des Wärmeinputs von ca. 9%. Es liegt somit nahe, dem Bandrockner anstatt, wie heute üblich feuchte Abluft (Brüde), trockenere und durch die ausgekoppelte Abluftwärme aufgewärmte Frischluft zuzuführen. Diese Kombination bringt **Einsparungen zwischen 16 und 19%**. Leider liegt diese Variante trotz den momentan hohen Energiepreisen bei einer **Payback-Zeit von 10 Jahren**. Die vorliegenden Resultate sind jedoch Hinweise, in eine Vortrocknung des Trocknungsgutes zu investieren und bei der Prozesswärmeerzeugung nach Alternativen (Umstellung auf Biomasse) zu suchen.

NACHHALTIGER UMGANG MIT ENERGIE UND RESSOURCEN

Das Projekt **Abfall-Lösungsmittel (ALM)-Verwertung in der chemischen Industrie** [6] hat zum Ziel, ein handliches PC-Programm **ecosolvent** zur Beurteilung der Abfalllösungsmittelverwertung nach ökologischen Gesichtspunkten zu entwickeln. Beurteilt werden die zwei wesentlichen Behandlungsoptionen von organischen ALM: (1.) Rückgewinnung von Lösungsmitteln durch Destillation und (2.) thermische Verwertung durch Verbrennen. Die **Projektschwerpunkte im Berichtsjahr** lagen bei der **Weiterentwicklung der ecosolvent-Software**. Wichtige Erneuerungen sind, dass wichtige Emissions-

flüsse und Ressourcen-Verbräuche separat ausgewiesen werden. Es kann auch eine Energiebilanz (kumulierter Primärenergiebedarf) und eine reine CO₂-Bilanz als Resultatausgabe gewählt werden. Weiter wurde die Bewertung potenzieller Abfalllösungsmittel-Transporte in der Software in die Software aufgenommen. Es wurde systematisch ALM-Gemische mit *ecosolvent* bewertet und einer umfassenden Sensitivitätsanalyse unterzogen. Die Unsicherheiten der einzelnen Modelle wurden ebenfalls untersucht (Bounding analysis, Monte carlo Analyse). Daraus konnten erste allgemeingültige Schlussfolgerungen zu den wichtigsten Lösungsmitteln formuliert werden.

Eine **Haupterkennnis: Keine der ALM-Verwertungsmethoden ist grundsätzlich umweltfreundlich**. Die gemeinhin in der chemischen Industrie verbreitete Annahme, dass Recycling aus rein ökologischer Sicht grundsätzlich sinnvoller ist, trifft nicht vollumfänglich zu. In Folge konnten Daumenregeln für die 45 wichtigsten Lösungsmittel aufgestellt werden (Bsp. In Fig. 5). Es wird auch gezeigt, wie Daumenregeln für spezifische ALM-Gemische mittel der *ecosolvent*-Software abgeleitet werden können. Das Projekt wird im Sommer 2006 mit der Verbreitung der Resultate und der Umsetzung der Software in eine Vollversion abgeschlossen.



Figur 5 :Das Beispiel von Essigsäure und Wasser zeigt, dass ab einer Lösungsmittelrückgewinnung von 0.89 kg pro kg ALM die Destillation grundsätzlich die aus Umweltsicht zu bevorzugende Technologie ist

Das Zusatzprojekt **Ökoinventare von petrochemischen Lösungsmitteln (LM)** [7] konnte im Berichtsjahr abgeschlossen werden. Ziel war es, diese Lücke bei den Ökoinventaren von Lösungsmitteln zu orten und diese gezielt zu schliessen. So wurde bei Essigester, Ethanol, Tetrahydrofuran, Cyclohexan und Heptan eine Datenvollerhebung durchgeführt. Bei 32 weiteren LM wurden die Daten erhoben soweit diese verfügbar waren. Fehlende Daten wurden anhand von LM mit ähnlichen Prozessschritten abgeschätzt. Der chemischen Industrie stehen nun die Öko-Inventare für 50 Lösungsmittel zwecks Ökobilanzierungen zur Verfügung.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Programm unterstützte im Berichtsjahr insgesamt vier Projekte aus dem ETH-Bereich. Fachhochschulen (Luzern, Rapperswil) konnten in zwei Forschungsprojekte der Industrie in Form von Semester- und Diplomarbeiten eingebunden werden.

Eine Zusammenarbeit im Rahmen der IEA-Programme oder EU findet z.Z. nicht statt, da das Interesse und Engagement der Industriepartner zu gering ist. Die Industriepartner empfahlen, letztlich auch - wegen beschränkter Mittel und Ressourcen - das Programm rein national auszurichten. Beim Projekt der EPFL, Leni (Pulp and Paper) wird aber mit der Technischen Hochschule Montreal, Kanada zusammengearbeitet.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Als Erfolgsprodukt darf das Ökobilanzierungstool **ecosolvent** [6] der ETHZ erwähnt werden. Dieses steht kurz vor Abschluss und wird von der chemischen Industrie als taugliches Beurteilungswerkzeug bei der Verwertungsfrage von Abfalllösungsmitteln nachgefragt. Erfreulich ist auch der vermehrte Einbezug von Fachhochschulen in Industrieprojekten.

Mit dem Projekt **Effizienzverbesserungen in Trocknungsanlagen** [5] wurde gezeigt, dass eine effizientere Wärmerückgewinnung bei Trocknungsprozessen technisch zwar machbar ist, der Ansatz trotz hohen Energiepreisen aber unwirtschaftlich bleibt und es sinnvoller ist, die Prozesswärmeerzeugung von fossilen Energieträgern z.B. auf Biomasse umzustellen. Diese Ergebnisse dienen den rund 70 Trocknungsbetrieben bei ihren anstehenden Investitionsentscheiden.

Rückschläge respektive Verzögerungen gab es bei den Forschungsprojekten, welche die messtechnische Erfassung von thermischen Prozessen und deren mathematische Modellierung zum Ziel hatten [1, 4]. Der **organisatorische Aufwand** und die Anforderungen an die **Qualität bei Anlagemessungen** wurden von den Projektteams **unterschätzt**. Wegen unbrauchbarer Messresultate konnten die vorgegebenen Ziele nicht vollumfänglich erreicht werden. Dieser Problematik muss in Zukunft mehr Beachtung geschenkt werden.

Im **April 2006** wird das BFE eine **Tagung Technologieförderung industrieller Prozesse** und anschliessend eine **Projektausschreibung** u.a. für Forschungsprojekte durchführen. Mit diesem proaktiven Vorgehen sollen die energieintensiven Unternehmen motiviert werden, innovative Energieprojekte durchzuführen und damit den Grundstein legen, Prozesse energieeffizienter und CO₂-ärmer zu gestalten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch) / Angebote Unternehmen

Auf der Programmseite www.bfe.admin.ch (Angebote Unternehmen) sowie unter den angegebenen Internet-Adressen sind weitere Berichte und Informationen verfügbar.

- [1] Andrej Szijarto, (andrej.szijarto@chem.ethz.ch), Institut für Chemie- und Bio-Ingenieur-Wissenschaften, Gruppe für Umwelt- und Sicherheitstechnologie, ETH Zürich: **Modeling and Optimization of Energy Consumption in Multipurpose Batch Plants**, Laufzeit 04-07 (JB).
- [2] F. Maréchal und Z. Perrin-Levasseur, (francois.marechal@epfl.ch), Laboratoire d'Energétique Industrielle, EPF Lausanne: **Efficient Energy Conversion in the Pulp and Paper Industry**, Laufzeit 05-08 (JB).
- [3] F. Bonvin, (michel.bonvin@hevs.ch) FH/HEVs Sion: **Intégration des processus énergétiques dans les cultures sous abris**, Laufzeit 05-06 (JB)
- [4] Jörg Peter Wurche, (peter.wurche@kieferpartners.ch) und Christian Gubler, Ziegelei Fisibach AG, Bauma: **Steigerung der Energieeffizienz in der Backsteinproduktion**, (JB) Laufzeit 05-06, <http://www.fbb.ch>
- [5] Stefan Krummenacher (stefan.krummenacher@energie-treuhand.ch) und J. Bürli, Trocknungsanlage Willisau: **Neue Verfahren zur Effizienzverbesserung in Trocknungsanlagen**, (SB) Laufzeit 05
- [6] Christian Capello (christian.capello@chem.ethz.ch) ETH Zürich: **Abfall-Lösungsmittelverwertung in der chemischen Industrie, Phase 2**, (JB) Laufzeit 03-06
- [7] Jürgen Sutter und Christian Capello (christian.capello@chem.ethz.ch) ETH Zürich: **Ökoinventare von petrochemischen Lösungsmitteln** (SB) Laufzeit 04-05