

S 5-1

Simulation von Wärmeübertragungsprozessen

Von Uwe Feuerriegel¹, Michael Pook¹, Gregor Wersch¹, Simon Wittenhorst¹, Jürgen Becker², Markus Ecker³, Ulrich Hoffmann⁴, Ulrich Kunz⁵

1 Einleitung

Wärmeübertragung ist die häufigste verfahrenstechnische Grundoperation der Prozessindustrie. Sie dient zum Heizen, Kühlen, Verdampfen und Kondensieren von Stoffen, wobei bei den beiden letztgenannten Grundoperationen Wärme- und Stoffübertragung gekoppelt sind. Die Grundlagen der Wärmeübertragung und die Berechnungsmethoden, die u.a. auf der Ähnlichkeitstheorie basieren und für die nachfolgend vorgestellten Projekte angewandt wurden, sind seit über 100 Jahren bekannt. Seit über 50 Jahren ist der VDI-Wärmeatlas [1] ein nicht nur im deutschen Sprachraum anerkanntes Regelwerk für die Auslegung von Wärmeübertragern. 2010 erschien die zweite Auflage der englischsprachigen Ausgabe VDI Heat Atlas [2]. Eine umfassende Darstellung, die als Lehrbuch und Nachschlagewerk geeignet ist, stellt das Buch Wärme- und Stoffübertragung der Autoren Baehr und Stephan dar [3].

Für die Auslegung von Wärmeübertragern und komplexen verfahrenstechnischen Prozessen dienen seit etwa 20 Jahren spezielle Softwareprogramme oder sogenannte Prozesssimulatoren wie ASPEN, CHEMCAD oder HYSIS. Neben den erheblichen Kosten, die solche Programme beim Kauf und durch Schulungen verursachen, haben sie oft einen weiteren Nachteil. So ist es für die Nutzer teilweise nicht leicht nachvollziehbar, wie und auf welcher theoretischen Basis der Rechengang bei der Auslegung der Wärmeübertrager erfolgt.

In der Lehre im Studiengang Prozesstechnik an der FH Aachen und in Kooperationen mit der Industrie wird deshalb ein zusätzlicher Weg verfolgt. Dies betrifft nicht nur die hier vorgestellten Wärmeübertragungsprozesse, sondern auch Prozesse der thermischen Verfahrenstechnik (Trocknung, Flüssig-Flüssig-Extraktion, Destillation, Absorption), der Strömungsmechanik (Anlagenkennlinien in Rohrleitungssystemen), der mechanischen Verfahrenstechnik (Partikelsysteme und entsprechende Grundoperationen) und der Berechnung von Stoffdaten von Reinstoffen und Gemischen. Die Berechnungen und Simulationen werden mit Excel-VBA ausgeführt, weil dieses Werkzeug den Studierenden und den Ingenieuren an ihrem Arbeitsplatz in der Regel uneingeschränkt zur Verfügung steht, was bei den oben genannten Programmen und Simulatoren oft nicht der Fall ist.

Excel von Microsoft® lässt sich für komplexe Berechnungen und mathematische Optimierungen erfolgreich einsetzen. Es enthält eine Reihe intrinsischer mathematischer Funktionalitäten

¹ Prof. Dr.-Ing. Uwe Feuerriegel, B. Eng. Michael Pook, Dipl.-Ing. Gregor Wersch, Dipl.-Ing. Simon Wittenhorst, Lehrgebiet Verfahrenstechnik, FH Aachen

² Dr. rer. nat. Jürgen Becker, Zentis GmbH & Co. KG, Aachen

³ Dipl.-Ing. Markus Ecker, TGE Gas Engineering GmbH, Bonn

⁴ Prof. Dr.-Ing. Ulrich Hoffmann, Lehrgebiet Prozessautomatisierung, FH Aachen

⁵ Prof. Dr.-Ing. Ulrich Kunz, Institut für Chemische Verfahrenstechnik, TU Clausthal

und wenn der SOLVER (ein sogenanntes Add-In) installiert wurde, lassen sich auch Gleichungen und Optimierungsaufgaben lösen. Visual Basic for Applications (VBA) basiert auf dem BASIC-Dialekt Visual Basic (VB) und ist eine zu Excel gehörende Skriptsprache, die zur Steuerung von Abläufen dient und mit der große Teile der vorgestellten Projekte erstellt wurden.

In den nachfolgenden Kapiteln werden Ergebnisse unterschiedlicher Projekte aus dem Bereich der Simulation von Wärmeübertragungsprozessen mit Excel-VBA vorgestellt:

- Thermische Behandlung hochviskoser Fruchtzubereitungen, verschiedene Projekte und Kooperationen mit der Zentis GmbH & Co. KG, Aachen (J. Becker, U. Feuerriegel, G. Wersch).
- Untersuchung des dynamischen Verhaltens von dampfbeheizten Ethylen-Verdampfern. Projekt mit der TGE Gas Engineering GmbH, Bonn (M. Ecker, U. Feuerriegel, U. Hoffmann, S. Wittenhorst).
- Dynamische Simulation des axialen Temperaturverlaufs von elektrisch beheizten Rohrreaktoren. Kooperation mit dem Institut für Chemische Verfahrenstechnik, TU Clausthal (U. Feuerriegel, U. Kunz, M. Pook, S. Wittenhorst).

2 Thermische Behandlung hochviskoser Fruchtzubereitungen

2.1 Heizen und Kühlen bei der Verarbeitung von Fruchtzubereitungen

Das Heizen und das Kühlen sowie auch das Schmelzen von im gefrorenen Zustand angelieferten Produkten sind häufig vorkommende Prozessschritte bei der Behandlung von Lebensmitteln oder hier von Fruchtzubereitungen. Sie dienen u.a. zur Aufbereitung und zur Haltbarmachung. Durch das Erhitzen werden Hefen, Schimmelpilze und Bakteriensporen abgetötet. Spezielle Verfahren sind das Pasteurisieren und die Sterilisation, wobei letztere bei höheren Temperaturen und längeren Haltezeiten durchgeführt werden.

Auf der anderen Seite sind bestimmte Produkteigenschaften gewünscht, die mit der Haltbarmachung kollidieren können, u.a. die Stückigkeit oder die Konsistenz von Früchten sowie Farbe, Geschmack und Vitamingehalt. Herausforderungen sind dabei die Temperaturempfindlichkeit der behandelten Früchte, relativ hohe und mit abnehmender Temperatur stark zunehmende Viskositäten sowie teilweise stückige und klebrige Produkte. Weiterhin zu beachten sind die besonderen Hygieneanforderungen für Produkte, die als Fruchtzubereitungen für Joghurt und Quark in die Molkereindustrie gehen.

Die verwendeten Energien beim Heizen und Kühlen der Prozesse sind effizient einzusetzen. Nachfolgend werden ausgewählte Teilprojekte der Kooperationen der vergangenen Jahre beispielhaft beschrieben.

2.2 Energieeffizienz bei Kochungsprozessen

Hinsichtlich der Energieeffizienz liegt das Optimierungspotential beim Heizen und Kühlen von Fruchtzubereitungen in der Reduzierung von Wärmeverlusten bei der Durchführung der Pro-

zesse und der Optimierung der Kochungszeiten (Schmelzen der tiefgefrorenen Produkte, Erwärmung und Kochung).

Eine Methode, um Wärmeverluste von Anlagen oder Anlagenteilen zu quantifizieren, ist die Infrarotthermografie, die eine Messung der Oberflächentemperaturen und die Ermittlung der Emissionsgrade der Oberflächen ermöglicht. Die Energieverluste von einer Oberfläche in die umgebende Luft – oder umgekehrt, wenn die Oberflächentemperatur geringer als die Lufttemperatur ist – setzen sich zusammen aus Verlusten infolge konvektiven Wärmeübergangs und Wärmestrahlung. Für die Berechnung dieser Verluste wurden Berechnungsmodule in Excel auf Basis der relevanten Abschnitte des VDI-Wärmeatlas erstellt.

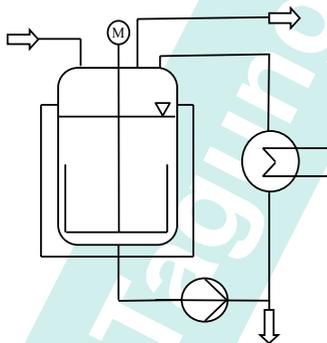
Die Optimierung von Chargenzeiten beim diskontinuierlichen Heizen oder Kühlen in Rührkesseln mit Doppelmantel setzt Berechnungen des Wärmedurchgangs vom Heiz- oder Kühlmedium in die Fruchtzubereitung oder umgekehrt voraus. Die Berechnungen dazu erfolgten ebenfalls in Excel unter Verwendung des VDI-Wärmeatlas.

2.3 Auswahl und Auslegung der Apparate zum Heizen/Kühlen

Das Aufheizen von Fruchtzubereitungen und das anschließend erforderliche Abkühlen können diskontinuierlich in Rührkesseln oder kontinuierlichen in Doppelrohr- und Rohrbündelwärmeübertragern erfolgen. Für die wärmetechnischen Berechnungen wurden auch hier Berechnungsmodule in Excel-VBA auf Basis des VDI-Wärmeatlas erstellt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte der Fruchtzubereitungen, insbesondere der Viskosität.

2.4 Eindampfung von hochviskosen Fruchtzubereitungen

Fruchtkonzentrate z.B. aus Aprikosen oder Pflaumen werden durch Eindampfung von Früchten hergestellt. Dies geschieht in Anlagen, in denen die Früchte erwärmt und eingedampft werden. Als verfahrenstechnische Apparate kommen hierfür Rührkessel oder Rohrbündelwärmeübertrager in Frage, siehe dazu die nachfolgende schematische Abbildung.



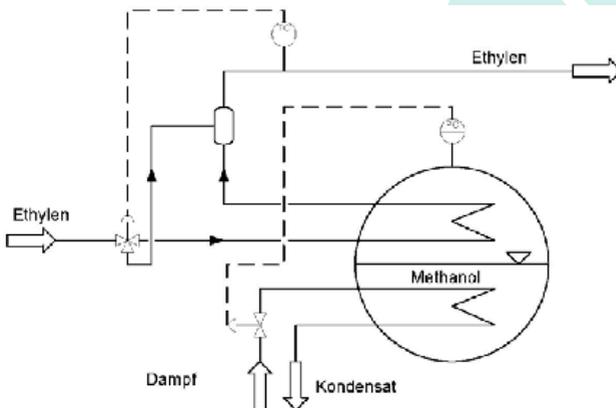
Fließschema einer vereinfacht dargestellten Anlage zur Eindampfung

In einem gemeinsam durchgeführten Projekt wurde die Anlagentechnik zur Eindampfung von Früchten in diskontinuierlicher oder kontinuierlicher Produktion optimiert. Dabei wurden unterschiedliche Anlagenkonzepte bzgl. Produktqualitäten, Energieaufwand und Kosten betrachtet.

3 Untersuchung des dynamischen Verhaltens von dampfbeheizten Ethylen-Verdampfern

3.1 Zielstellung

Aufgabe der im Rahmen des Projekts simulierten Verdampfer ist die überkritische Erwärmung von jeweils bis zu 75 t/h tiefkalten Ethylens von -100 °C auf eine Solltemperatur von $+40\text{ °C}$ bei einem Druck von ca. 53 bar. Die Beheizung von Ethylen mit Dampf würde bei diesen Bedingungen zum Überschreiten der kritischen Wärmestromdichte (Filmsieden/DNB, Dryout) führen, weshalb Methanol als Zwischenmedium verwendet wird, siehe Fließschema.



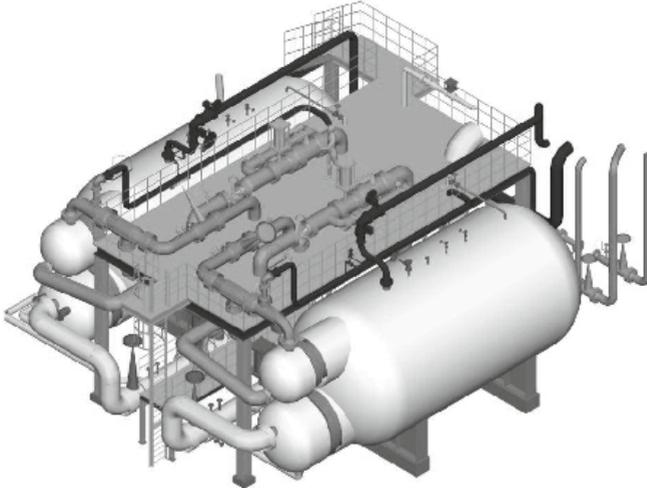
Fließschema Kohlenwasserstoff-Verdampfer

Große Änderungen der Abnahmemengen haben in der Vergangenheit zu Problemen bei der Regelung der Apparate geführt, was sogar das Ansprechen der Sicherheitseinrichtungen bewirkte. Die Simulation gibt das dynamische Verhalten des Wärmeübertragers wieder und ermöglicht die regelungstechnische Optimierung des Wärmeübertragers, u.a. zur Untersuchung von Betriebs- und Störungsszenarien.

3.2 Wärmetechnische Berechnungen und Simulation

Basis der Simulation ist die Berechnung der Wärmetransportvorgänge – ausgehend von der Kondensation des Heizmediums Dampf im unteren Rohrbündel über die Verdampfung des Zwischenmediums Methanol im Mantelraum bis zu seiner Kondensation bei gleichzeitiger Erwärmung des Ethylens im oberen Rohrbündel auf Basis der entsprechenden Abschnitte des

VDI-Wärmeatlas. Eine wichtige Rolle für das dynamische Verhalten des Wärmeübertragers spielt die Energiespeicherung im Zwischenmedium und im Stahl.



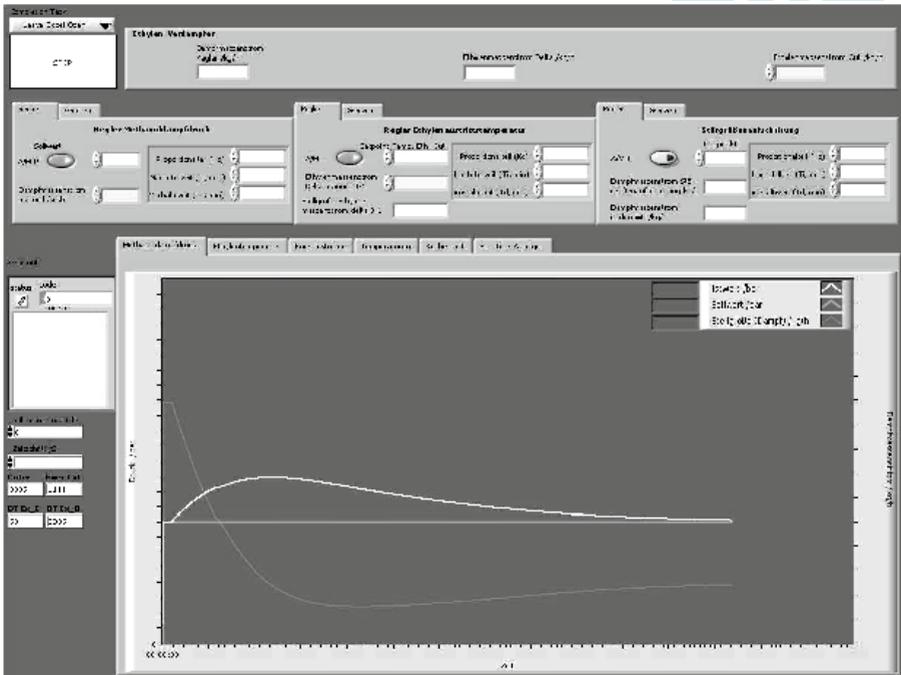
Darstellung der Verdampferanlage in 3D [TGE Gas Engineering GmbH, Bonn]

Die numerische Simulation der Wärmetransportvorgänge erfolgte über eine örtliche und zeitliche Diskretisierung in Excel-VBA, die regelungstechnische Simulation in LabVIEW von National Instruments. Die Kommunikation der Programme wurde über ActiveX erreicht. Durch die Verknüpfung wurden die Vorteile der einzelnen Programme ausgenutzt und kombiniert. Die Simulation gibt das Verhalten im Betrieb optimal wieder.

3.3 Ergebnisse der regelungstechnischen Optimierungen

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Bedienoberfläche des Prozesses in LabVIEW. Im dargestellten Fall wurde eine Änderung des Ethylenmassenstroms vorgenommen und das Verhalten der Regelung simuliert (alle dem Betriebsgeheimnis unterliegenden Angaben wurden entfernt). Von dieser Oberfläche aus wird die Simulation gesteuert, was dem Fahren der Anlage im späteren Betrieb entspricht.

Nach regelungstechnischer Optimierung durch Installation einer Feedforward-Regelung ist der Prozess sehr gut beherrschbar. Selbst bei großen Störungen verhält sich der Verdampfer stabil und der Dampfdruck des Methanols liegt jederzeit deutlich unterhalb des Ansprechdrucks des Sicherheitsventils. Mit der Simulation wurden Reglerparameter gefunden, die bereits bei der Erstinbetriebnahme ein sicheres Verhalten des Prozesses gewährleisten. Ein Abblasen der Methanolfüllung des Wärmeübertragers sollte somit in Zukunft sicher ausgeschlossen werden können [4].



Bedienoberfläche des Prozesses in LabVIEW

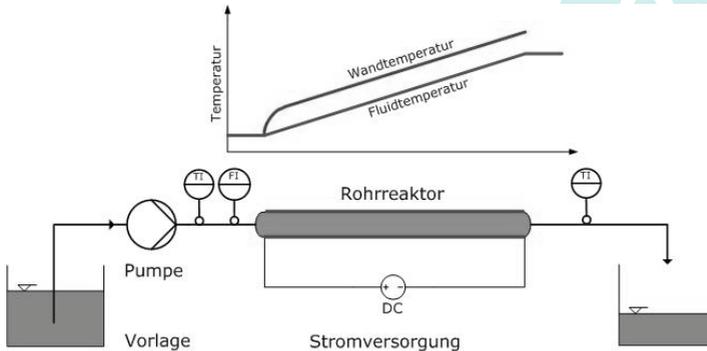
4 Dynamische Simulation des axialen Temperaturverlaufs von elektrisch beheizten Rohrreaktoren

4.1 Vorteile elektrischer beheizter Rohrreaktoren

Die Einhaltung von definierten Temperaturbereichen oder -profilen in fluiddurchströmten Rohrreaktoren ist z. B. für Untersuchungen im Labormaßstab in der chemischen Reaktionstechnik von Bedeutung. Hiervon kann abhängen, ob und in welchem Maß die gewünschten Reaktionen oder physikalische Prozesse ablaufen. Chemische Reaktoren werden in der Regel als Wärmeübertrager ausgeführt und indirekt mit Wärmeträgermedien, z. B. Ölen, beheizt, wobei diese Medien wiederum in separaten Anlagenteilen erwärmt werden und damit zusätzliche apparative Einrichtungen erforderlich sind.

Für kontinuierlich betriebene Rohrreaktoren stellt die direkte elektrische Beheizung eine interessante Alternative dar. Dabei wird eine niedrige Spannung direkt an das aus Metall bestehende Reaktorrohr angelegt und die Rohrwand dadurch aufgeheizt. Die dabei umgewandelte Energie wird als Wärme an das im Inneren des Rohres strömende Fluid abgegeben. Vorteile der direkten elektrischen Beheizung:

- Einfacher Aufbau, Wegfall zusätzlicher apparativer Einrichtungen,
- Wegfall von Wärmeträgermedien und Einrichtungen für deren Aufheizung,
- sehr gleichmäßige Wärmezufuhr über die Rohroberfläche, Vermeidung von Hot Spots,
- Einstellung von z. B. linearen Temperaturprofilen über die Reaktorlaufänge möglich,
- gute Regelbarkeit der Heizleistung, drastisch verringerte Totzeiten.



Fließschema der Anlage mit dem elektrisch beheizten Rohrreaktor

Die Abbildung zeigt das Fließschema der Versuchsanlage mit den schematischen Temperaturprofilen (Wand- und Fluidtemperaturen), die sich über die Lauflänge des Rohrreaktors einstellen.

4.2 Simulation der axialen Temperaturprofile

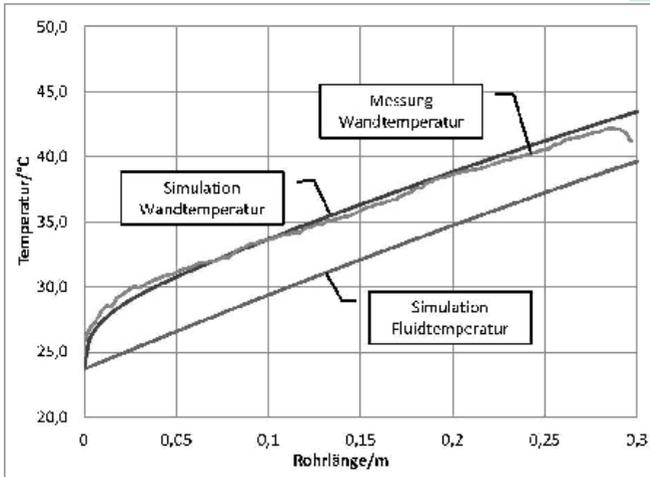
Die Berechnung der axialen Wand- und Fluidtemperaturverläufe für den stationären Betrieb erfolgt über ein Finite-Differenzen-Verfahren mittels einer örtlichen Diskretisierung auf Basis der lokalen Energiebilanzen. Die Berechnung der an das Fluid und an die Umgebung abgeführten Wärmeströme erfolgt unter Berücksichtigung des VDI-Wärmeatlas [1] (Wärmeübergang infolge erzwungener Konvektion an das Fluid, Wärmeübergang infolge freier Konvektion an die Umgebung, Strahlungsaustausch mit der Umgebung).

Die zeitabhängigen Temperaturprofile beim Aufheizen (unter Zufuhr elektrischer Energie) oder Abkühlen (Abschalten der Zufuhr elektrischer Energie nach erfolgtem Aufheizen) werden wie zuvor beschrieben bei zusätzlicher zeitlicher Diskretisierung ermittelt. Als Werkzeug für die Simulationen dient Excel-VBA.

4.3 Ergebnisse der Simulationen und Infrarot-Messungen

Für die bei einer direkten elektrischen Beheizung des Rohres vorliegende Randbedingung "konstante Wärmestromdichte" ergeben sich im stationären Betrieb die erwarteten praktisch linearen axialen Verläufe für die Wand- und die Fluidtemperaturen [3], siehe Abbildung. Die

dynamischen Aufheiz- und Abkühlvorgänge lassen sich ebenfalls mit hoher Genauigkeit simulieren.



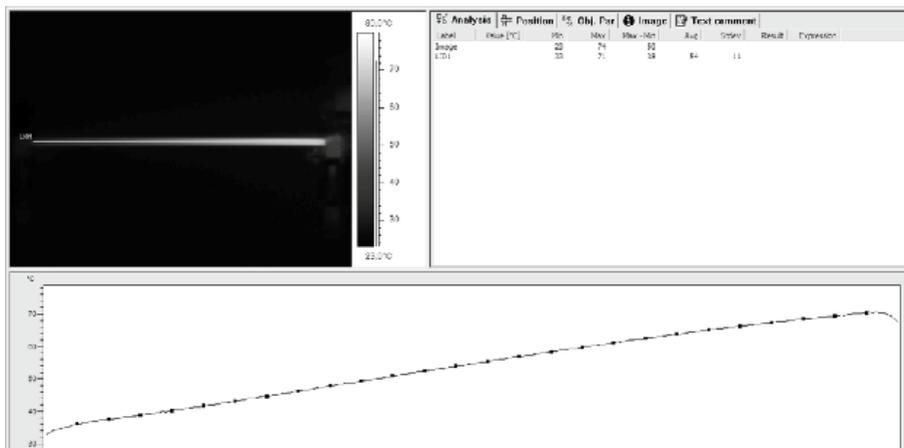
Stationäre gemessene und simulierte Temperaturverläufe eines typischen Versuchs

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Versuchsanlage: Im Bildvordergrund die Infrarotkamera mit Display, im Bildhintergrund oben der Rohrreaktor. Darunter befinden sich der Schaltschrank mit der Stromversorgung und die Mikrozahnringpumpe (rechts neben dem Schaltschrank).



Foto des Versuchsaufbaus (Hinweise siehe Text).

Ein Screenshot der Auswertesoftware zeigt einen typischen gemessenen Temperaturverlauf an der Rohroberfläche mit dem dazu gehörenden IR-Thermogramm. Der Vergleich der Simulationen mit den Infrarot-Messungen zeigte eine sehr gute Übereinstimmung. Zukünftige Untersuchungen bieten sich insbesondere für Prozesse mit Phasenumwandlung durch Verdampfung und im Rohrreaktor ablaufende chemische Reaktionen an [5,6].



Screenshot der Auswertesoftware

5 Literatur

- [1] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2006): VDI-Wärmeatlas. Berechnungsunterlagen für Druckverlust, Wärme- und Stoffübergang. 10., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer.
- [2] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (2010): VDI Heat Atlas. 2nd. Berlin: Springer.
- [3] Baehr, H. D.; Stephan, K. (2010): Wärme- und Stoffübertragung. 7., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer.
- [4] Wittenhorst, S.; Feuerriegel, U.; Hoffmann, U.; Ecker, M.: Untersuchung des dynamischen Verhaltens von dampfbeheizten Kohlenwasserstoff-Verdampfern. Posterbeitrag auf der ProcessNet-Jahrestagung 2010, Aachen. Chem.-Ing.-Tech. 82 (2010) Nr. 9, S. 1417.
- [5] Feuerriegel, U.; Kunz, U.; Wittenhorst, S.: Infrared imaging and simulation of temperature profiles in directly electrically-heated tubular reactors. 5. Internationales Infrarotforum infraR&D 2009, Fulda.
- [6] Schlange, A.; Dos Santos, A. R.; Kunz, U.; Turek, T.: Continuous preparation of carbon-nanotube-supported platinum catalysts in a flow reactor directly heated by electric current. Beilstein J. Org. Chem. 7 (2011) 1412-1420