

## **Wissensbasierte Reduzierung des Energie- und Wasserbedarfs bei der Weinerzeugung mittels informationstechnologischer Hybride auf der Grundlage von Referenz-Petri-Netzen**

### **Holistic modeling and simulation of water and energy demand in wine production processes using Java and reference nets**

**Martin Schütz<sup>a</sup>, Mira Schwinn<sup>b</sup>, Stefan Hubert<sup>a</sup>, Frauke Groß<sup>a</sup>, Dominik Durner<sup>b</sup>, Ulrich Fischer<sup>b</sup>, Antonio Delgado<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 4, D-91058 Erlangen;

<sup>b</sup> Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum DLR - Rheinpfalz, Abt. Weinbau und Oenologie, Breitenweg 71, D-67435 Neustadt/Weinstr.

Prozessvirtualisierung, Modellierung und Simulation, Energiemanagement, Referenznetze  
process virtualisation, holistic modelling and simulation, energy management, reference nets

### **Zusammenfassung**

Übergeordnete Zielsetzung der vorgestellten Forschungsarbeiten ist die ganzheitliche und verkettete Einzel- und Gesamtprozessanalyse zur wissensbasierten Reduzierung des Energie- und Wasserbedarfs am Beispiel der Weinbereitung als saisonal geprägten, wasser- und energieintensiven Prozess. Konkret wird ein hybrides Simulationstool entwickelt, das, auf Grundlage von Referenz-Petri-Netzen und der Programmiersprache Java, die gleichzeitige Modellierung verschiedener Systemklassen (deterministisch/stochastisch) und unterschiedlicher Zeitabhängigkeiten (diskret/ kontinuierlich) zur Operation innerhalb einer vorgegebenen Sammlung von Geräten und Gerätetypen ermöglicht. Basierend auf einer Vielzahl vorhandener Verteilungsfunktionen können außerdem stochastische Simulationen und numerische Lösungen dynamischer Modellen realisiert werden.

### **Einleitung und Zielsetzung**

Vor dem Hintergrund der seitens FAO und Weltwirtschaftsforum thematisierten Risiken im Zusammenhang mit der steigenden Nachfrage nach Frischwasser, Energie und Lebensmitteln, gewinnt zunehmend die holistische Betrachtung der Stoff- und Energieströme von Verarbeitungsprozessen Bedeutung (Bazilian, M. et al., 2011; FAO., 2014; Nagel, M., 2011; WEF., 2014). Über die lokale Betrachtung einzelner Prozessschritte hinaus, bietet die ganzheitliche und verknüpfte Abbildung und Modellierung von Energie- und Stoffströmen in Produktionsprozessen im Sinne einer Virtualisierung enormes Potential u.a. bezüglich der Optimierung des Wasser- und Energiebedarfs.

Zur Erstellung einer geeigneten Datenbasis des Simulationstools werden in enger Zusammenarbeit mit Weinwirtschaftsbetrieben sowohl Prozess- und Betriebsdaten zusammenge-

führt, als auch unbekannte Stoff- und Energieflüsse in verschiedenen Weinwirtschaftsbetrieben durch geeignete Messtechniken erfasst, den einzelnen Prozessschritten zugeordnet und in Datenbanken organisiert.

Mithilfe der durch die Simulation erhaltenen Daten wird es anschließend möglich Abschätzungen über den energetischen Nutzen von Änderungen im Prozessablauf sowohl im Vorfeld als auch während der Weinbereitung zu treffen. Beispielsweise könnte hier der zeitliche Verlauf des Stoff- und Energiebedarfs in einem individuellen Tank während der Weinbereitung nachvollzogen oder auch vorhergesagt werden. Ebenso können vor der Anschaffung von neuen Geräten diese als virtuelle Geräte innerhalb des Softwaretools eingefügt und getestet werden. Dies ermöglicht eine Abschätzung des Änderungspotentials von Einzelprozessen und des Gesamtprozesses vor Neuinvestitionen.

### **Virtuelle Abbildung von Weinwirtschaftsbetrieben auf der Grundlage eines hybriden RPN-basierten verketteten Ansatzes**

Weinwirtschaftsbetriebe verfügen über eine Vielzahl verschiedener Prozesse und Geräte, für deren virtuelle Abbildung zahlreiche verschiedene Modellklassen benötigt werden. Prozesse lassen sich zum Beispiel in deterministische und stochastische unterscheiden. Beide Prozess- bzw. Systemklassen finden sich in Weinwirtschaftsbetrieben. Während des Herbstgeschäftes werden bei den Betrieben unterschiedliche Mengen und Sorten von Trauben bzw. Traubenmost angeliefert. Da es nahezu unmöglich ist, belastbare Vorhersagen zu treffen, welche Mengen und Sorten zu welchem genauen Zeitpunkt angeliefert werden, ist der taktgebende Prozess, die Anlieferung während des Herbstgeschäftes, beispielsweise stochastischer Natur. Weiterhin können Prozesse in dynamische und statische aufgeteilt werden. Da alle Prozesse innerhalb eines Weinwirtschaftsbetriebes von der Zeit abhängen, werden hier vor allem dynamische Modellierungen notwendig. Bezüglich der Darstellung der Zeitabhängigkeit unterscheiden sich diskrete und kontinuierliche Modelle. Diskrete Zeitabhängigkeit findet sich typischerweise in der chargenorientierten Fahrweise, die in Weinwirtschaftsbetrieben z. B. während der Gärung auftritt. Das Ereignis „Start einer Gärung“ ist diskreter Natur. Kontinuierliche Prozesse betreffen beispielsweise die Betrachtung des Zuckerabbaus während einer laufenden Gärung.

Die Prozesse der Weinherstellung erfordern außerdem den Einsatz zahlreicher Geräte in den Weinwirtschaftsbetrieben. Dazu zählen beispielsweise Pumpen verschiedener Art, Separatoren und Behälter. Jeder dieser Gerätetypen kommt in einer größeren Anzahl und unterschiedlicher Ausprägung innerhalb eines Betriebes vor.

Für die virtuelle Abbildung von Weinwirtschaftsbetrieben, inklusive des Großteils der vorhandenen Prozesse und Geräte, wird daher im Rahmen der Projektarbeiten ein Ansatz gewählt, der folgende Anforderungen erfüllen muss:

- Modellierung verschiedener Systemklassen (deterministisch/stochastisch),
- Modellierung unterschiedlicher Zeitabhängigkeiten (diskret/kontinuierlich) und
- Modellierung einer großen Anzahl an Geräten und Gerätetypen.

Das Modellierungssystem sollte es zudem ermöglichen:

- Entitäten, wie Geräte und Prozesse, zu erstellen,
- Zustände darzustellen,
- Kommunikation zwischen Entitäten, z. B. Pumpen und Prozessen, abzubilden,
- hierarchische Strukturen zu berücksichtigen und
- Sequenzen und Nebenläufigkeit abzubilden.

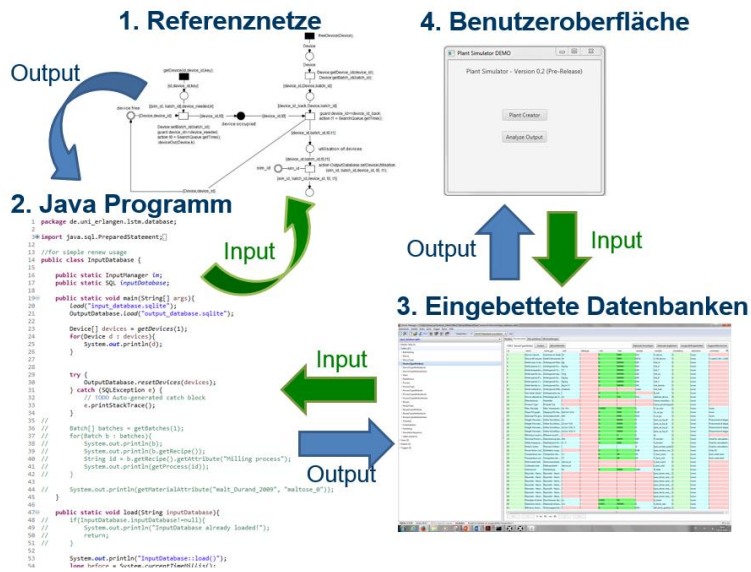
Viele dieser Bedingungen erfüllen Petri Netze bzw. vor allem ihre *High-Level* Erweiterungen, wie Referenznetze. Um den zusätzlichen Anforderungen, wie dynamischer und stochastischer Modellierung, gerecht zu werden, werden Referenznetze mit weiteren Java Bibliotheken verknüpft. Somit wird die numerische Lösung von dynamischen Modellen und die stochastische Simulation, basierend auf einer Vielzahl vorhandener Verteilungsfunktionen, ermöglicht (vgl. Hubert, et al., 2015; Hubert, et al., 2016; Pettigrew, et al., 2015).

Dazu wurde, im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeiten, zunächst die Verwendung einer derartigen Kombination aus Referenznetzen und Java geprüft, um im weiteren Projektverlauf sukzessive an die Gegebenheiten von Weinwirtschaftsbetrieben angepasst zu werden. Für das Simulationstool wird eine Grundarchitektur verwendet, die sich neben den Referenz-Petri-Netzen (RPN) und der Java Programmiersprache im Wesentlichen aus zwei eingebetteten Datenbanken und der Benutzeroberfläche zusammensetzt. Eine Darstellung der Grundarchitektur des Simulationskonzeptes zeigt **Abbildung 1**.



**Abbildung 1:** Grundarchitektur des Simulationskonzeptes, das sich in vier Ebenen gliedert.

Die in **Abbildung 1** dargestellte Nummerierung von 1. bis 4., beginnt mit den Referenznetzen (1.) aus Sicht des Entwicklers, der auf Grundlage des Gesamtprozessplans und der Einzelprozesse die erforderlichen RPN designt. Programme in Java (2.) und das Datenbankkonzept (3.), bestehend aus *Input*- und *Output*-Datenbanken, agieren für den Benutzer unsichtbar im Hintergrund und dienen als Bindeglieder zu der an letzter Stelle genannten Benutzeroberfläche (4.). Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten der Grundarchitektur sind in **Abbildung 2** mit Pfeilen graphisch angedeutet. Die Pfeile mit den Bezeichnungen *Input* und *Output* zeigen dabei einen Transport von Daten an. Innerhalb der Referenznetze werden Pakete der Programmiersprache Java importiert. Dies ermöglicht den Zugriff auf Klassen, die sich in den importierten Paketen befinden. Die Klassen beinhalten Funktionen (Methoden), die durch Transitionen innerhalb des RPN aufgerufen werden können. Die eingebetteten Datenbanken dienen einerseits zur strukturierten Speicherung der während der Simulation berechneten Daten und andererseits als ein Daten-*Input* für die vor der Simulation bereits bekannten individuell verschiedenen Parameter, wie beispielsweise Kennwerte von Geräten eines bestimmten Weinwirtschaftsbetriebes. Zur besseren Verständlichkeit, wird im Folgendem auf die Elemente der Grundarchitektur näher eingegangen und ihre Funktion bei der Simulation aufgezeigt.



**Abbildung 2:** Mögliche Interaktionen innerhalb der Grundarchitektur des Simulationskonzepts.

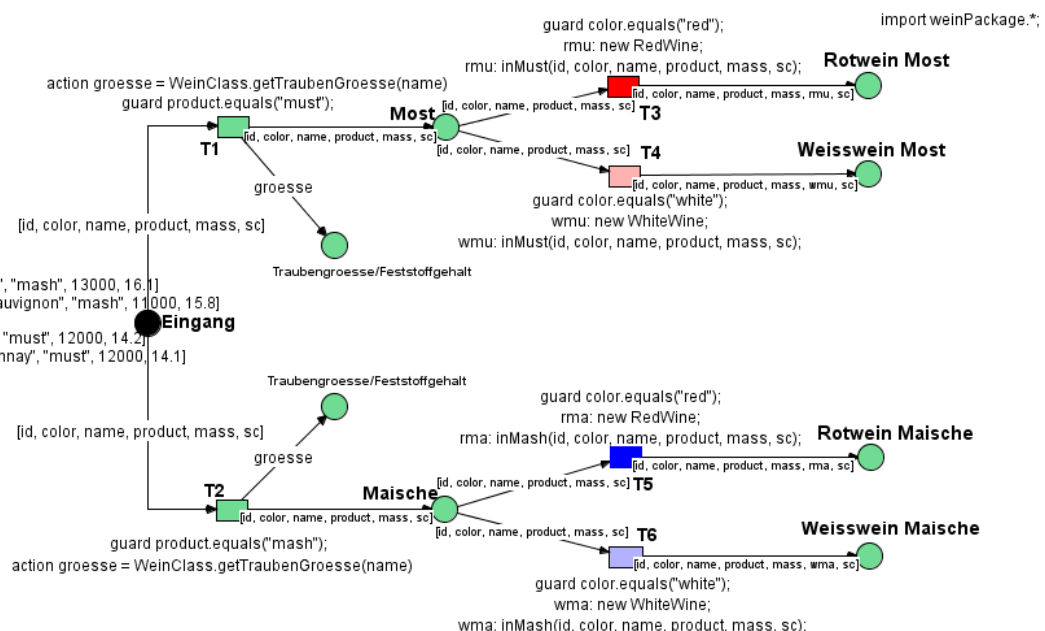
## Referenz-Petri-Netze (RPN)

RPN-Modelle werden mit der freien Software *The Reference Net Workshop* (Renew, <http://www.renew.de/>, Universität Hamburg) erstellt. Sie sind aufgrund der Darstellung der Verbindungen zwischen den Komponenten mittels Pfeilen ein übersichtliches und nachvollziehbares Instrument zur Modellierung. Neben der Möglichkeit zeitliche Abhängigkeiten zu visualisieren gibt es auch die Option Netze innerhalb von Netzen als Marken weiter zu geben. Im Wesentlichen finden zwei verschiedene Knotenarten, die durch gerichtete Kanten verbunden werden, Anwendung. Der passive Knotentyp *Platz* wird als Kreis symbolisiert, er dient zur Darstellung von Zuständen und kann sog. *Marken* beinhalten. *Transitionen* repräsentieren die aktiven Komponenten. Sie führen Veränderungen herbei und werden als Rechtecke symbolisiert. Der Aufruf von Berechnungen (Methoden in Java) kann beim Schalten von Transitionen stattfinden. Eine Transition kann mehrere Aktionen gleichzeitig ausführen. Für das Schalten einer Transition müssen die Eingangsplätze belegt sein, alle Schaltaktionen durchführbar sein und die Ausgangsbedingungen realisierbar sein. Die beiden genannten Knotentypen werden mit Pfeilen verbunden und abwechselnd verwendet. Falls innerhalb der Netzstruktur auf einen Platz ein weiteres Element folgt, ist dies eine Transition. Gibt es einen direkten Nachfolger einer Transition, so ist dies ein Platz. Weitere Details zum Formalismus bei Referenznetzen finden sich in Kummer (2001).

Zur Darstellung des Gesamtprozesses in *Renew* wird eine Aufteilung in eine Vorauswahl des zu verarbeitenden Produktes und die darauf folgenden Prozessketten der Rotwein- oder Weißweinbereitung vorgenommen. Das zur Vorauswahl des Produktes gestaltete RPN wird im Folgenden näher beschrieben (**Abbildung 3**).

Eingangs generiert das RPN nach der Anlieferung eine Differenzierung zwischen einerseits roten Trauben und weißen Trauben und andererseits zwischen Most und Maische. Somit ergeben sich vier verschiedene Anfangszustände: Rotwein Most, Weißwein Most, Rotwein Maische, Weißwein Maische. Diese vier Möglichkeiten sind in **Abbildung 3** auf der rechten Seite als beschriftete Zustände dargestellt. Der Platz für den Eingang des Produktes befindet

sich auf der linken Seite des Petrinetzes und ist schwarz markiert. Er speichert Marken mit den relevanten Eingangsinformationen wie z. B. Rebsorte, Liefermenge oder Zuckergehalt. Ihm folgen zwei parallel geschaltete Transitionen (T1 und T2) zur Unterscheidung zwischen einer Mostanlieferung (T1) und einer Maischeanlieferung (T2). Diese Transitionen nehmen als zusätzliche Aktion eine Zuordnung der Beerengröße vor. Diese Funktion kann erweitert werden, um unter Berücksichtigung des Volumens der Beeren und des Zusammensetzungsverhältnisses von Fruchtfleisch und Traubenhaut eine Abschätzung des Feststoffgehaltes zu erhalten. Darauf aufbauend können, für eine möglichst exakte Abbildung der Realität, weitere Größen, wie z. B. ein Koeffizient für die Saftausbeute oder ein Wertebereich der dynamischen Viskosität, abgeschätzt werden. Nach der Einteilung in Most und Maische folgen jeweils zwei verschieden farblich gekennzeichnete Transitionen, die eine Unterscheidung nach der Beerenfarbe vornehmen. Diese Transitionen generieren zusätzlich die erforderlichen Unternetze für eine Rot- bzw. Weißweinverarbeitung und schalten in diesen die erforderlichen Transitionen für eine Most- bzw. Maischeanlieferung. Die Transitionen zur Farberkennung des roten Mostes (T3) sind dunkelrot markiert, während für weißen Most (T4) eine hellrote Markierung vorgenommen wurde. Die Transitionen zur Farberkennung der Maische sind für rote Maische (T5) dunkelblau und für weiße Maische (T6) in Hellblau dargestellt.



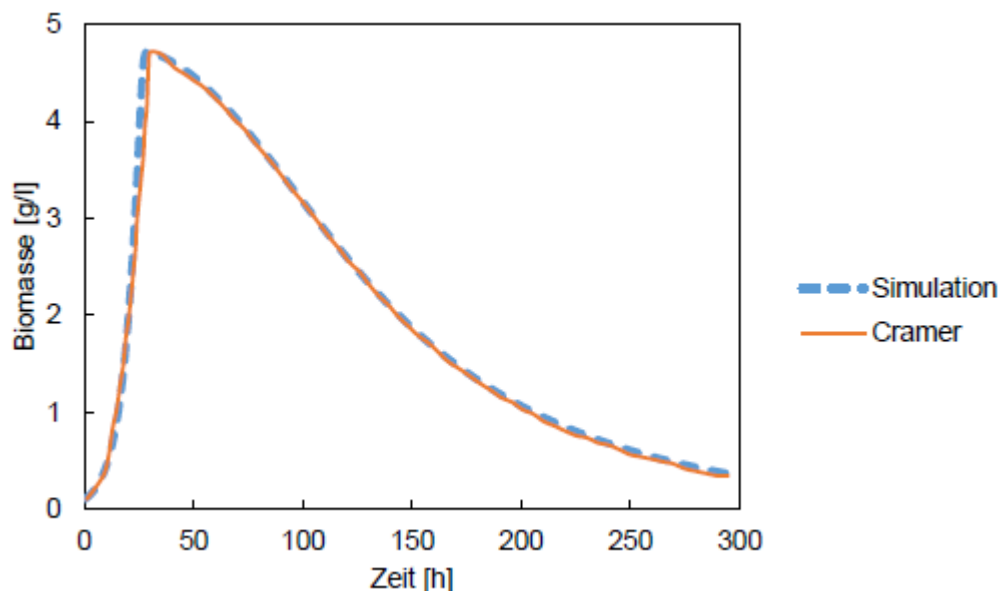
**Abbildung 3:** RPN Vorauswahl des Produktes „Weißwein“ oder „Rotwein“ bzw. „Most“ und „Maische“.

## Java Programmiersprache

Pakete aus der objektorientierten Programmiersprache Java lassen sich in die RPN importieren. Dies ermöglicht eine Integration von verschiedenen und vielfältigen zusätzlichen Möglichkeiten innerhalb der Software *Renew*. Das Einbinden von Programmen für Berechnungen oder zum Ausführen von Anweisungen in das RPN ist zentraler Bestandteil des Simulationstools. Beispielsweise wird via Java Kommunikation und Transfer von Daten der RPN mit dem Datenbanksystem gewährleistet.

Eine Abbildung von kontinuierlichen Prozessen der Weinbereitung kann durch die Implementierung von Modellen in Java umgesetzt werden. Im Bereich der Gärung wurde ein Modell,

basierend auf einem System aus differential-algebraischen Gleichungen, in Java implementiert. Das Modell beruht auf der Arbeit von Cramer et al. (2002). Dazu wurden Gleichungen zur Berechnung der zeitlichen Veränderung der Lebzellkonzentration, der Absterbe- und der Wachstumsrate der Biomasse, der spezifischen Ethanolproduktionsrate und der zeitlichen Veränderung von Stickstoff, Ethanol und Zucker implementiert. Um die Implementierung zu verifizieren, wurde der mit Java simulierte zeitliche Verlauf der Gärung bei gleichen Eingangswerten mit den validierten Ergebnissen aus den Veröffentlichungen von Cramer et al. (2002) verglichen. Dafür wurden mittels der Software *Engauge Digitizer* die Werte aus dem Paper entnommen und digitalisiert. Die Implementierung in Java verwendet die Bibliothek *Apache Commons Math 3.5* (<https://commons.apache.org/math>), die zahlreiche numerische Integrationen beinhaltet. Für die Simulation wird auf ein klassisches Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung mit einer Schrittgröße von 0,01 zurückgegriffen. Der Vergleich der in Java umgesetzten Modellierung mit den Literaturwerten zeigt nahezu identische zeitanhängige Änderungen der Konzentrationen von Biomasse, Stickstoff, Ethanol und Substrat. Exemplarisch ist der Verlauf der Biomassekonzentration in **Abbildung 4** dargestellt.



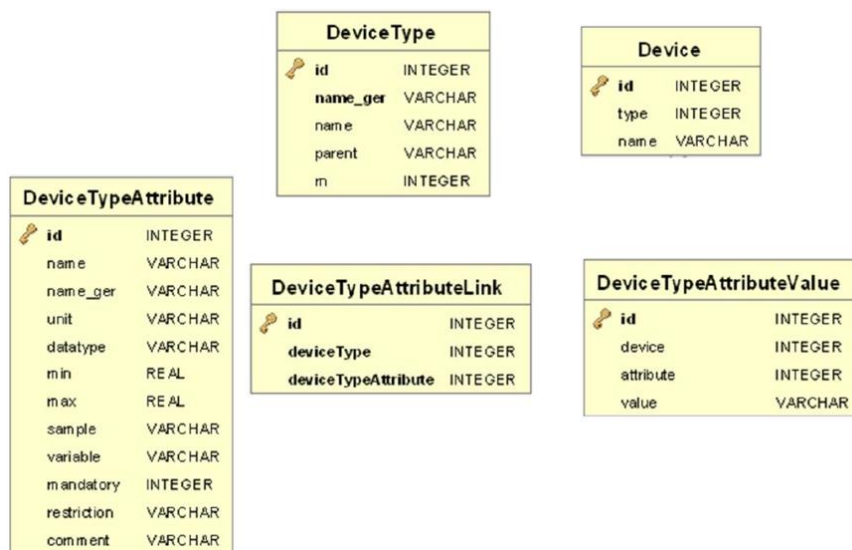
**Abbildung 4:** Verlauf der Biomassekonzentration über die Zeit als Vergleich zwischen der Simulation mittels Implementierung in Java und den Angaben in Cramer et al. (2002).

## Datenbanken

Ein System aus zwei übergeordneten Datenbanken wird zur Organisation der für die Simulation notwendigen Datenstrukturierung verwendet. Zur Bearbeitung der Datenbankstruktur findet die frei zugängliche Software SQLite Manager als *Add-on* im Mozilla Firefox Browser Einsatz. In einer *Input*-Datenbank sind alle für die Simulation relevanten Eingangswerte hinterlegt. In einer *Output*-Datenbank werden die simulierten Werte ausgegeben. Durch die Datenbanken kann eine Strukturierung vorgenommen werden, die es ermöglicht Werte bestimmten Geräten und Zeitpunkten zuzuordnen.

Die *Input*-Datenbank ist in Tabellen untergliedert, die zur Darstellung von Geräten, Prozessen, Rezepten, Unternehmen und deren Verknüpfungen verwendet werden. Eine Tabelle speichert die simulierten Unternehmen mit Namen und ordnet ihnen eine ID zu. Die in den einzelnen Weinbetrieben jeweils vorhandenen Geräte werden in einer weiteren Tabelle zu-

geordnet. Die verwendeten Geräte, Prozesse und Rezepte sind jeweils aus fünf einzelnen Tabellen aufgebaut und strukturell gleichartig verbunden. Die Verknüpfungsstruktur innerhalb der fünf Tabellen bei den Geräten, Prozessen und Rezepten werden am Beispiel der Geräte erläutert. Die Tabelle *DeviceType* enthält eine Auflistung mit der Speicherung der verschiedenen Gerätetypen (z.B. „Tank“). Die bestimmten Eigenschaften oder Attribute zur Beschreibung der in den Weinwirtschaftsbetrieben vorhandenen Geräte sind in der Tabelle *DeviceTypeAttribute* hinterlegt. Mögliche Attribute, könnten z.B. das „Füllvolumen“ oder die „Nennleistung“ eines Gerätes darstellen. Die Zuordnung der möglichen Attribute zu den verschiedenen Gerätetypen wird in der Datenbank *DeviceTypeAttributeLink* vorgenommen. Hier könnte beispielsweise dem Gerätetyp „Tank“ das Attribut „Füllvolumen“ zugeteilt werden. Die einzelnen, individuellen, in den Betrieben vorhandenen Geräte, sind in der Tabelle *Device* hinterlegt. Hier wird z.B. ein Gerät vom Typ Tank, das an einem bekannten Platz im zu simulierenden Betrieb steht mit der Bezeichnung „Tank 07“ gespeichert. Eine Zuweisung von Werten zu den Attributen der individuell vorhandenen Geräte wird mit der Tabelle *DeviceTypeAttributeValue* realisiert. Ein mögliches anwendungsbezogenes Beispiel hierfür ist die Zuweisung eines Wertes von „10000 Liter“ (Value) für das „Füllvolumen“ (Attribut) des im zu simulierenden Unternehmen vorhandenen Gerätes „Tank 07“ (Device). Für die Darstellung der Prozesse und Rezepte sind die Bezeichnungen analog gewählt. Anstelle der Benennung „Device“ werden „Process“ und „Recipe“ verwendet. Somit ergeben sich zur Abbildung der Prozesse die Tabellen *ProcessType*, *ProcessTypeAttribute*, *ProcessTypeAttributeLink*, *Process*, *ProcessTypeAttributeValue* und zur Darstellung der Rezepte die Tabellen *RecipeType*, *RecipeTypeAttribute*, *RecipeTypeAttributeLink*, *Recipe*, *RecipeTypeAttributeValue*. Die Beziehungen zwischen den Tabellen der Rezepte und Prozesse sind ebenso gewählt wie oben bei den Geräten beschrieben (siehe **Abbildung 5**).



**Abbildung 5:** Verwendete Tabellen zur Abbildung der Geräte und ihrer Eigenschaften innerhalb der Datenbankstruktur. Die Namen der Tabellen sind jeweils im Kopf der fünf einzelnen Graphen angegeben. Die verwendeten Bezeichnungen und Datentypen des Inhaltes sind im Körper darunter ersichtlich.

## Graphische Benutzeroberfläche (GUI)

Die GUI stellt die Ebene des Simulationstools dar, mit der der Anwender in direkte Berührung kommt. Hier werden die für die Simulation erforderlichen individuell verschiedenen Angaben eingegeben. Der Benutzer erstellt hier seinen Betrieb virtuell mit der Eingabe der für sein Unternehmen charakteristischen Daten. Neben der Eingabe der Daten dient die Benutzeroberfläche ebenso auch zur Ausgabe der Simulationsergebnisse. So kann beispielsweise der zeitliche Verlauf für die Auslastung von „Tank 07“ oder der Verlauf des elektrischen Energiebedarfs der „Pumpe 02“ über die Zeit während der gesamten Simulationsdauer graphisch ausgegeben werden. Für die Verwendung der GUI ist es nicht erforderlich die anderen Aspekte der Grundarchitektur im Detail zu kennen. Die Ansteuerung und Kommunikation zwischen Referenz-Petri-Netzen, Datenbanken und Java-Programmen geschieht automatisch im Hintergrund. Während der Gesamtprozess simuliert wird und die Transitionen der RPN schalten, füllt sich die *Output*-Datenbank mit den simulierten Werten. Diese werden dem Anwender auf Anfrage mit Hilfe der Graphischen Benutzeroberfläche präsentiert.

## Dankesworte

Die vorgestellten Ergebnisse sind im Zuge von Forschungsarbeiten entstanden. Die betreffenden IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI) wurden und werden über die AiF im Rahmen des Programms der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft gefördert. AiF-Projekt Nr. 17720N und 18358N. Ein besonderer Dank gilt auch dem Institut für Umweltverfahrenstechnik der Universität Bremen für die bereichernde Kooperation bei den Forschungsarbeiten.

## Literatur

- Bazilian, M. et al., 2011:** “Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach”, *Energy Policy*, Vol. 39, No. 12, pp 7896-7906.
- Cramer, A. C., Vlassides, S. & Block, D. E., 2002.** “Kinetic model for nitrogen-limited wine fermentations”, *Bioprocess and biosystems engineering*, Vol. 77, No.1, pp. 49–60.
- FAO., 2014:** The Water-Energy-Food Nexus. A new approach in support of food security and sustainable agriculture. Retrieved June 10, 2015, from Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Hubert, S. et al., 2015:** “Simulation Modeling of Bottling Line Water Demand Levels using Reference Nets and Stochastic Models”, *Untington Beach, CA, s.n.*, pp. 2272-2281.
- Hubert, S., Helmers, T., Groß, F. & Delgado, A., 2016:** “Data driven stochastic modelling and simulation of cooling demand within breweries”, *Journal of Food Engineering*, Band 176, pp. 97-109.
- Kummer, O., 2001:** “Introduction to Petri Nets and Reference Nets”, *Sozionik Aktuell*, Band 1, pp. 7-16.
- Nagel, M., 2011:** „Softwaretools zur Kapazitätsplanung in lebensmittel- und biotechnologischen Betrieben“, Aachen: Shaker-Verlag.
- Pettigrew, L., Hubert, S., Groß, F. & Delgado, A., 2015:** „Implementation of Dynamic Biological Process Models into a Reference Net Simulation Environment“, *Dortmund, s.n.*, pp. 651–660.
- WEF., 2014:** Global Risks 2014, Ninth edition, World Economic Forum. Geneva, Switzerland.