

Projektbericht

Stoff- und Energieflußanalyse

Simulation der Kläranlage Osnabrück mit Umberto[®] Anwendung auf das Abwasser der Universität Osnabrück

Heike Wursthorn

**Institut für Umweltsystemforschung
Artilleriestraße 34
49069 Osnabrück**

18.5.1998

1	Überblick	1
2	Stoff- und Energieflußanalyse	1
2.1	Einleitung	1
2.2	Definitionen	2
2.2.1	Ökobilanz	2
2.2.2	Produktökobilanz	3
2.2.3	Sachbilanz	4
2.2.4	Stoffstromanalyse	5
2.2.5	Stoffstrommanagement	6
2.2.6	Öko-Audit	6
2.3	Bilanzierung – Probleme und Möglichkeiten	7
3	Stoffstrommodellierung	7
3.1	Stoffstrommodellierung mit Flußdiagrammen	7
3.2	Stoffstrommodellierung mit Petri-Netzen	7
4	Bilanzierungssoftware Umberto®	10
4.1	Modellierung des zu untersuchenden Stoffsystems	10
4.2	Berechnung unbekannter Stoffströme und -bestände	11
4.3	Darstellung von Stoff- und Energiestromdaten sowie Bewertung	12
5	Kläranlage Osnabrück	12
5.1	Verfahren zur Abwasserreinigung	12
5.1.1	Mechanische Reinigung (1. Stufe)	12
5.1.2	Aerobe biologische Reinigung (2. Stufe)	12
5.1.3	Weitergehende Reinigung (3. Stufe)	13
5.1.4	Schlammbehandlung, Faulgas und Klärschlamm	14
5.2	Beschreibung der Kläranlage Osnabrück	16
5.2.1	Geschichtlicher Überblick	16
5.2.2	Kanalisationssystem	16
5.2.3	Kurzdarstellung	16
5.2.4	Datengewinnung	16
5.2.4.1	Input und Output	17
5.2.4.2	Energiebilanz	17
5.2.4.3	Analytik	18

6	Umberto [®] -Transitionsmodule	19
6.1	Modulbibliothek	19
6.2	Transitionsmodule “Kläranlagen”	20
6.3	Transition “Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette”	21
6.3.1	Materialien	21
6.3.2	Parameter	21
6.3.3	Funktionen	22
7	Modellierung der Kläranlage Osnabrück	27
7.1	Benutzerdefinierte Transitionsspezifikation	27
7.2	Transition “Kläranlage Osnabrück”	27
7.2.1	Materialien	27
7.2.2	Parameter	28
7.2.3	Funktionen	30
8	Simulation der Abwasserklärung	35
8.1	Zusammensetzung des Abwassers	35
8.2	Abwassermenge	36
8.3	Stoffstromnetz	36
9	Ergebnisse	38
10	Vergleich	43
11	Dank	48
12	Literatur	48
12.1	Stoffstromanalyse und Umberto [®]	48
12.2	Abwasser und Kläranlagen	49

1 Überblick

Der Studiengang “Angewandte Systemwissenschaft” beinhaltet im Hauptstudium die eigenständige Bearbeitung eines Projekts. Der vorliegende Bericht umfaßt die Ergebnisse des Projekts “*Stoff- und Energieflußanalyse - Simulation der Kläranlage Osnabrück mit Umberto[®] und Anwendung auf das Abwasser der Universität Osnabrück*”, durchgeführt am Institut für Umweltsystemforschung.

Die Thematik erforderte die Einarbeitung in verschiedene Bereiche wie:

- Stoff- und Energieflußanalyse (Kap. 2)
- Stoffstrommodellierung mit der Bilanzierungssoftware Umberto[®] (Kap. 3 und Kap. 4)
- Prozesse in Kläranlagen (Kap. 5.1)

Durch den Besuch der Kläranlage Osnabrück wurden in mehreren Gesprächen Daten zur Funktionsweise der Kläranlage, zu verwendeten Stoffen und eingesetzter Energie sowie zu gemessenen chemischen, biologischen und physikalischen Parametern zusammengestellt. (Kap. 5.2)

Die in Umberto[®] vorliegende Kläranlagen-Modellierung “Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette” wurde analysiert. Hierzu waren Recherchen bei den Modellierern vom Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg notwendig, da die Dokumentation der Gleichungen, welche die Transition beschreiben, im Umberto[®]-Handbuch nicht vollständig ist. (Kap. 6)

Auf der Grundlage des gesammelten Datenmaterials läßt sich das Klärwerk Osnabrück simulieren. Hierzu wurden die Prozeßdefinitionen der Standard-Transition umgeschrieben und durch zusätzliche Formeln ergänzt. Die Verwendung der spezifischen Parameter erlaubt nun, das spezielle System “Kläranlage Osnabrück” zu beschreiben. (Kap. 7)

In Anschluß daran wurde die Abwasserbilanz der Universität Osnabrück für das Jahr 1996 erstellt. Sie enthält alle Stoffe und Energieformen, die zur Klärung des universitären Abwassers eingesetzt werden bzw. die hierbei in der Kläranlage entstehen. (Kap. 8 und Kap. 9)

Abschließend folgt ein Vergleich der Abwasserbilanzen, die durch die Simulation mit der Transition “Kläranlage Osnabrück” sowie durch die Simulation mit der Umberto[®]-Transition “Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette” erstellt wurden. (Kap. 10)

Die Ergebnisse dieser Arbeit fließen ein in das Projekt “*Stoff- und Energieflußanalyse einer Universität – Entwicklung eines Umweltmanagementsystems für Hochschulen am Beispiel der Universität Osnabrück*”, welches derzeit vom Institut für Umweltsystemforschung in Zusammenarbeit mit der Verwaltung der Universität Osnabrück durchgeführt wird (VIEBAHN, MATTHIES, 1998).

2 Stoff- und Energieflußanalyse

2.1 Einleitung

Vom Menschen bewegte Stoffströme haben qualitativ und quantitativ eine Dimension angenommen, die den globalen Stoffhaushalt insgesamt beeinflusst. Ozonloch, Treibhauseffekt oder saurer Regen sind populäre Beispiele für die Reichweite unserer Eingriffe in das natürliche System. Der bisherige, medial angelegte und reparierende Umweltschutz bietet keinen ausreichenden Lösungsansatz für die ökologische Misere.

Inzwischen setzt sich die Erkenntnis durch, daß vielmehr *eine systematische, lebenszyklusweite Betrachtung und Gestaltung der Stoffströme* erforderlich ist: von der Bereitstellung über die Nutzung bis zur Abfallbehandlung.

Im folgenden werden einige in diesem Zusammenhang verwendete Begriffe erläutert.

2.2 Definitionen

2.2.1 Ökobilanz

Umgangssprachlich wird das Wort Ökobilanz für eine Vielzahl von Untersuchungen verwendet. Eine exakte fachliche Definition existiert bis heute nicht, so daß hier die Ansätze dreier Arbeitsgruppen vorgestellt werden.

PROJEKTGEMEINSCHAFT "LEBENSWEGBILANZEN" (1992)

Ökobilanz

- = Oberbegriff für Bilanzen der stofflichen und energetischen Einflüsse eines Untersuchungsgegenstandes (Unternehmen, Gemeinde, Dienstleistung, Produkt, Herstellungsprozeß) auf die Umwelt.
- = Liste der umweltbeeinflussenden und nichtumweltbeeinflussenden Größen, die an den Grenzen des Bilanzraumes auftreten. Sie werden entweder als Daten ausgewiesen oder qualitativ beschreiben.

Lebenswegbilanz

- = Life Cycle Assessment (LCA)
- = produktbezogene Ökobilanz
- = spezielle Ökobilanz für Produkte
Bilanziert die Umweltauswirkungen eines Produktes über den gesamten Lebensweg "von der Wiege bis zur Bahre" (from the cradle to the grave), d.h. von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung.

Umweltbetriebsbilanz

- = betriebliche Ökobilanz
- = spezielle Ökobilanz für ein Unternehmen
Ist standort- oder firmenbezogen und stellt das ökologische Gegenstück zur kaufmännischen Betriebsbilanz eines Unternehmens dar.

Ökoprofil

- = bewertete Ökobilanz

BRAUNSCHWEIG UND MÜLLER-WENK (1993)

Ökobilanz

= ökologisch bewertete Stoff- und Energiebilanz.

Stoff- und Energiebilanz

= Inventory Analysis

Darstellung von Stoffflüssen und Energieverbräuchen in physikalischen Größen, einschließlich Bodenversiegelung, Lärmemissionen usw.

HULPKE UND MARSMANN (1994)

Die Verknüpfung der Ressourcen- und Umweltdebatte mit einer umfassenden Betrachtung von ökonomischen Prozessen gilt hier als die Besonderheit, die die Popularität des Begriffes Ökobilanz ausmacht. Zu berücksichtigen sind folgende Bereiche:

- Entnahme und Bereitstellung von Rohstoffen
- Herstellung, Verarbeitung und Formulierung
- Transport und Verteilung
- Verwendung, Wiedergebrauch und Instandhaltung
- Recycling
- Abfallverwertung

Zur deren Beschreibung werden folgende Parameter angeführt:

- Verbrauch materieller Ressourcen
- Verbrauch an Energieträgern
- Stoffliche Belastung der Luft
- Stoffliche Belastung des Wassers
- Belastung des Bodens mit Abfällen

Entscheidend sind dabei:

- Systemansatz
- umfassende Betrachtung eines Produktes von der Wiege bis zur Bahre

Allgemeine Zielformulierung einer Ökobilanz:

- Schonung bzw. effiziente Nutzung materieller Ressourcen
- Verringerung bzw. Minimierung der Belastung der Umwelt durch Emissionen und Abfälle

2.2.2 Produktökobilanz

Hier zeichnet sich eine Vereinheitlichung der Definition durch die Bemühungen der SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) und der internationalen Normierungsgremien (ISO 14040ff) ab.

Das Konzept beruht auf vier Bestandteilen (Abb. 2.1):

- Zieldefinition
- Sachbilanz
- Wirkungsbilanz
- Bilanzbewertung

Dazu kommt eine Schwachstellen- und Optimierungsanalyse (Improvement Analysis), die entweder an die Bilanzbewertung anschließt oder bereits parallel zur Sachbilanz erfolgt.

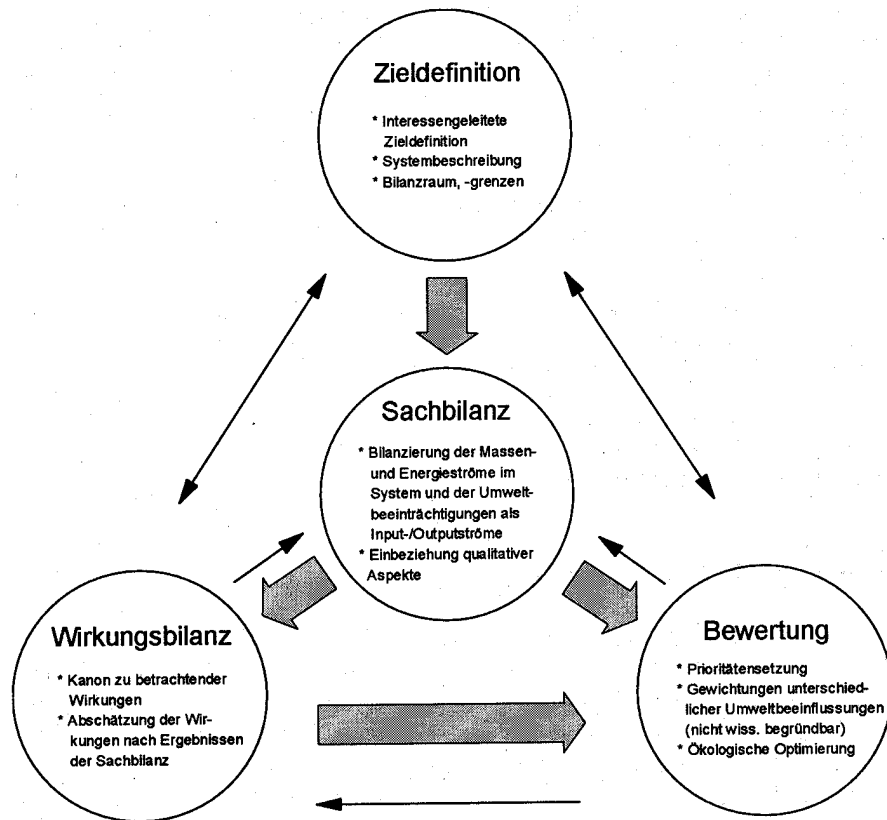


Abb. 2.1: Prozessschema einer produktbezogenen Ökobilanz¹

2.2.3 Sachbilanz

Bilanziert die Stoff- und Energieflüsse einschließlich der Emissionen *als Input- und Output-Größen*. (Abb. 2.2)

Umfaßt den gesamten Lebensweg der Produkte:

- Rohstofferschließung und –aufarbeitung
- Produktion und Weiterverarbeitung
- Distribution, Transport
- Gebrauch, Verbrauch und Nutzungsdauer
- Entsorgung, einschließlich Recycling

Analysiert die mit dem Lebensweg verbundenen Beeinflussungen der Umwelt durch Fluß- und/oder Bestandsgrößen, z.B.

- Luft-, Wasser- und Bodenbelastung durch Schadstoffe
- Verbrauch an Rohstoffen, Energieträgern, Wasser, Flächen
- Belastung durch Abfall und Lärm

Die Sachbilanz ist somit eine *Stofffluß- oder Stoffstromanalyse*. Sie liefert die wesentlichen Informationen, die für eine Wirkungsbilanz und für eine Bilanzbewertung erforderlich sind.

Diese Stoffstromanalyse ist der quantitative Kern der Sachbilanz und damit insgesamt der Ökobilanz.

¹ SCHMIDT, SCHORB (1995)

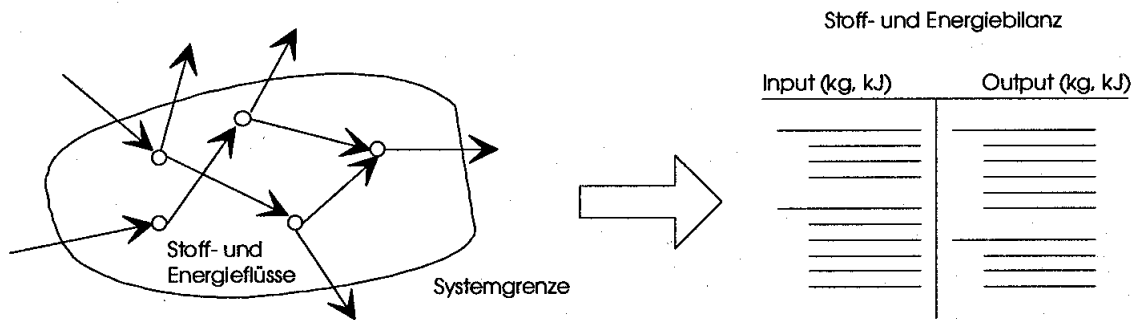


Abb. 2.2: Sachbilanz²

2.2.4 Stoffstromanalyse

Stoffstromanalyse ist nach LÜTZKENDORF (1992) die inputseitige und outputseitige Bilanzierung der ökologisch relevanten Stoff- und Energieströme, bezogen auf einen Einzelprozeß, ein Unternehmen, ein Produkt usw.

Stoffe können hierbei sowohl Einzelstoffe (z.B. im Sinne von chemischen Elementen oder Verbindungen) als auch Güter auf einer höheren stofflichen Aggregationsebene sein (z.B. Ressourcen, Rohstoffe, Produkte, Emissionen, Anfälle).

Energieströme werden, von unterschiedlichen Maßeinheiten abgesehen, weitgehend gleich wie Stoffströme bilanziert.

Falls erforderlich, wird eine Prozeßkettenanalyse durchgeführt, bei der ein Gesamtsystem in Teilprozesse unterteilt wird, die zueinander mittels ihrer Stoff- und Energieströme in Verbindung stehen. Ein Produktlebensweg wird somit in einzelne Teilprozesse, z.B. aus den Bereichen Herstellung, Transport, Nutzung oder Abfallbehandlung zerlegt. Für jeden Teilprozeß werden die Input- und Outputströme dargestellt (Abb. 2.3).

² SCHMIDT, SCHORB (1995)

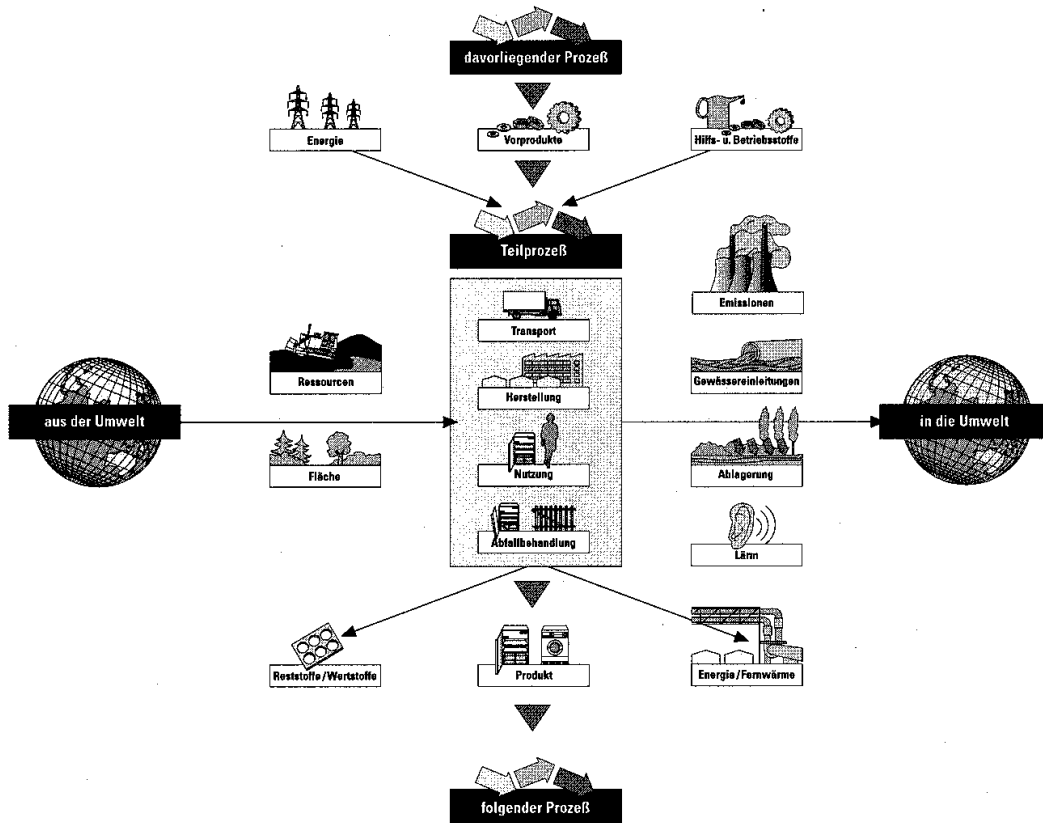


Abb. 2.3: Teilprozesse eines Produktlebensweges³

2.2.5 Stoffstrommanagement

Die ENQUÊTE-KOMMISSION "Schutz des Menschen und der Umwelt" (1994) erhielt den Auftrag, geeignete Maßnahmen für den Umgang mit Stoff- und Materialströmen zu entwickeln. Im umfangreichen Abschlußbericht sind die Ergebnisse und Empfehlungen zusammengefaßt.

Ökologisches Stoffstrommanagement

= Zielorientiertes, verantwortliches, ganzheitliches und effizientes Beeinflussen von Stoffsystemen. Den Orientierungsrahmen für das Stoffstrommanagement bildet das Leitbild "Sustainable Development".

2.2.6 Öko-Audit

Der Vollständigkeit halber wird dieser Begriff genannt, der mit dem bisher aufgeführten Themenkomplex eng zusammenhängt. Jedoch:

Das Öko-Audit ist nicht gleichbedeutend mit der Einführung oder Durchführung von Ökobilanzen.

Gemäß der *EG-Öko-Audit-Verordnung* von 1993 (Verordnung Nr. 1836/93 des Rates vom 28.06.1993, Abl. Nr. L 168 vom 10.7.1993, S.1) wird an die Umweltbetriebsprüfung die Anforderung gestellt, eine systematische, dokumentierte, regelmäßige und objektive Bewertung zuzulassen. *Ziel* ist die Etablierung und Überprüfung eines betrieblichen Umweltmanagementsystems. Die Erstellung und Fortschreibung einer Ökobilanz kann hierzu der erste Schritt sein. Sie ermöglicht zudem eine ökologische Schwachstellenanalyse oder die Etablierung eines Ökokontrollings.

³ SCHMIDT, HÄUSLEIN (1997)

Die EG-Öko-Audit-Verordnung, welche auch EMAS (Environmental Management Audit Scheme) genannt wird, ist europäischer Standard, hat allerdings 1996 durch die weltweit gültige ISO-Norm 14000 "Environment Management Systems" Konkurrenz erhalten .

Anzuführen ist jedoch ein großes Manko dieser EG-Verordnung: Es werden zwar einerseits umfangreiche Anforderungen an den betrieblichen Umweltschutz bzw. an Umweltmanagementsysteme gestellt, andererseits werden aber keine geeigneten Instrumente empfohlen. Der Verordnungstext bleibt damit in weiten Bereichen allgemein und unkonkret und hat viele Unsicherheiten in der Diskussion über die Einführung des Öko-Audits ausgelöst.

2.3 Bilanzierung – Probleme und Möglichkeiten

Da komplexe, miteinander vernetzte Systeme analysiert werden müssen, treten erhebliche methodische Probleme bei der Erstellung und Bewertung von Ökobilanzen auf. Im Besonderen sind hierbei zu nennen:

- Auswahl des Bilanzraumes:
Welche Prozesse werden wie in die Bilanzierung einbezogen?
Welche Vorketten müssen berücksichtigt werden?
- Bewertungsproblem:
Durch die Berücksichtigung mehrerer Umweltmedien und darin jeweils mehrerer Wirkungsbereiche müssen unterschiedliche Wirkkategorien verglichen und gegeneinander abgewogen werden, z.B. Luftemissionen mit Abwasser- oder Flächenverbrauch.

Zu beachten ist, daß eine Ökobilanz grundsätzlich nie mehr Daten liefert, als über Umweltwirkungen von Produktionsprozessen oder menschlichen Tätigkeiten bereits bekannt sind oder speziell dafür erhoben werden. Das Innovative einer Ökobilanz ist vielmehr, daß sie Wissen neu zusammenfaßt, neue Erkenntnisse und Bewertungen ermöglicht und als Ergebnis stets das gesamte System umfaßt. So spricht man hier auch von *ganzheitlicher Bilanzierung*.

Der Vorteil der Bilanzierung liegt darin, daß sie ein umfassendes Analyseinstrument darstellt und eine breite Datengrundlage schafft, mit dem umweltpolitische Entscheidungen, Systemoptimierungen oder Investitionsentscheidungen erheblich besser fundiert werden können.

3 Stoffstrommodellierung

3.1 Stoffstrommodellierung mit Flußdiagrammen

Ein naheliegender Ansatz zur Modellierung von Stoffströmen ist die Verwendung von Flußdiagrammen (flow charts).

Hierbei existiert jedoch ein *grundsätzliches Problem*: Es treten zeitliche Verwerfungen auf, resultierend aus der Lagerung von Stoffen im Eingangs- oder Ausgangslager des Systems. Die Ursache der Schwierigkeiten liegt darin, daß nur Stoff- und Energieströme betrachtet werden, jedoch nicht Stoffbestände.

3.2 Stoffstrommodellierung mit Petri-Netzen

Die *systematische Integration von Beständen* in Stoffstromanalysen ist die Eigenheit der sogenannten Stoffstromnetze. Sie basieren auf den sogenannten Petri-Netzen, einem speziellen Netztyp der theoretischen Informatik.

Ihren Ursprung hat die Theorie der Petri-Netze in der Informationsverarbeitung. Sie wurde nicht zuletzt auch für die klassische Prozeßsteuerung verwendet. Als weiterentwickelte Theorie von Flüssen in Netzwerken eignet sie sich hervorragend zur Modellierung von Stoffstromnetzen.

Petri-Netze ermöglichen mit einer strengen Systematik nicht nur den *Aufbau komplexer Systeme*, sondern auch die *kombinierte Strom- und Bestandsrechnung*.

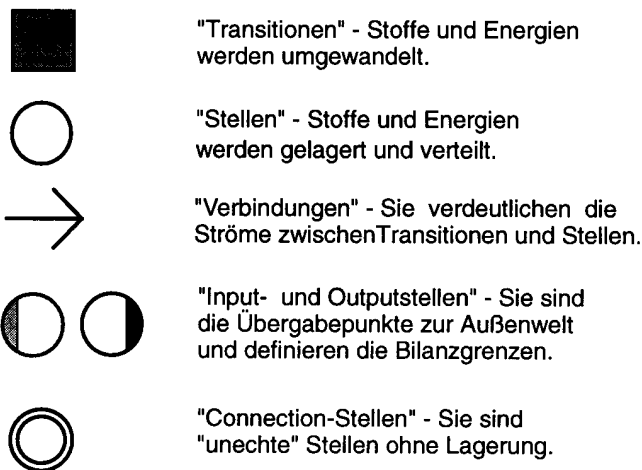
So liefern diese Netze für eine bestimmte Betrachtungsperiode und bei gegebenen Anfangsbeständen Aussagen darüber, welche Stoff- und Energieströme in einem System wo fließen und welche Endbestände daraus resultieren. Diese Daten können im Rahmen einer Stoffstromanalyse weiterverarbeitet werden. Das heißt: Strom- und Beständedaten stehen in ihrer Gesamtheit weiteren Auswertungen zur Verfügung.

Stoffstromnetze bestehen aus drei verschiedenen Elementklassen (Abb. 3.1):

Die Knoten im Netz können entweder *Transitionen* (Quadrate in der graphischen Darstellung) oder *Stellen* (Kreise in der graphischen Darstellung) sein.

Die Knoten werden durch *Verbindungen* (Pfeile in der graphischen Darstellung) miteinander verknüpft, diese bilden die Kanten im Netz.

Die Netzelemente eines Stoffstromnetzes



Formale Bedingung für das Netz:

Transitionen und Stellen müssen sich im Stoffstromnetz als Knoten abwechseln.

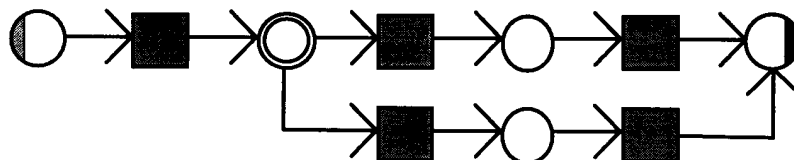


Abb. 3.1: Netzelemente und formale Bedingungen für den Aufbau eines Stoffstromnetzes⁴

⁴ SCHMIDT, HÄUSLEIN (1997)

In den *Transitionen* finden die *Energie- und Stoffumwandlungen* eines Stoffstromnetzes statt. Aus verschiedenen Energie- und/oder Stoffströmen auf der Input-Seite entstehen nach definierten Regeln oder Rezepturen neue Energien und/oder Stoffe auf der Output-Seite. Die Transition steht für den Zusammenhang von Entstehung und Abgang, somit für eine *Aktivität*.

Stellen sind dagegen *Lager*, in denen keine Materialumwandlungen erfolgen, sondern nur das Halten von *Energie- und Stoffbeständen* sowie die Verteilung derselben. Allgemein verbindet sich mit der Stelle die Modellierung eines *Zustandes*.

Es gibt zudem *Sondertypen* von Stellen: *Input- und Outputstellen* bilden die Übergabepunkte der Bilanz zur Außenwelt. *Connection-Stellen* können die Ströme nur verteilen, wirken aber nicht als Lager.

Verbindungen zeigen an, wie die Energien und Stoffe im Netz fließen, welche Prozesse über die Energie- und Stoffströme miteinander verknüpft sind.

Der *Stoffstromnetz-Formalismus* besteht u. a. darin, daß Stellen und Transitionen sich als Knoten in einem Netz stets abwechseln. Eine Transition kann also nie mit einer anderen Transition direkt, sondern immer nur über eine Stelle verbunden sein. Findet zwischen zwei Prozessen keine Lagerhaltung statt, dann müssen die Transitionen durch eine Connection-Stelle miteinander verbunden werden (Abb. 3.2).

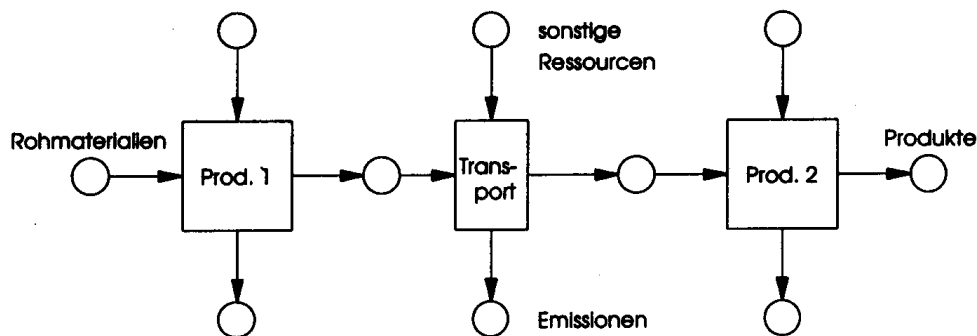


Abb. 3.2: Stoffstromnetz für eine Prozeßkette⁵

Zwei Kategorien von Knoten zu unterscheiden, ist sowohl Merkmal erfolgreicher Methoden des betrieblichen Rechnungswesens ("Doppelte Buchführung") als auch ein Grundgedanke der Petri-Netztheorie. Mit dieser *Zustands-Aktivitäts-Dichotomie* geht die systematische Einschränkung möglicher Verbindungen zwischen den Knoten einher. Es kann somit, wie bereits erwähnt, keine Verbindung direkt zwischen zwei Stellen oder direkt zwischen zwei Transitionen geben.

⁵ SCHMIDT, SCHORB(1995)

Eine Prozeßkette des Alltags wird in Abb. 3.3 veranschaulicht.

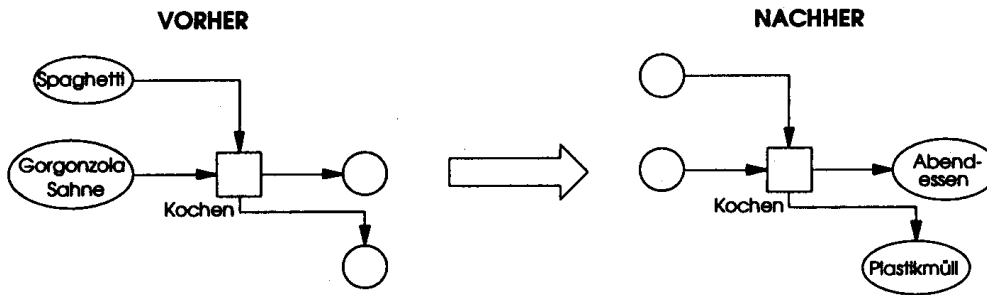


Abb. 3.3: Das Gorgonzola-Beispiel⁶

Zusammenfassend werden im folgenden die wesentlichen Anforderungen an Stoffstromnetze dargestellt:

- Mit Stoffstromnetzen können beliebig *komplexe* Produktionsnetze oder Produktlebenswege modular aus Einzelprozessen aufgebaut werden.
- Es erfolgt eine *vollkonsistente Strom- und Bestandsrechnung* des Stoffstromnetzes. Wenn der Anwender die Produktionsprozesse in den Transitionen richtig beschrieben hat, können im Netz keine Energien oder Stoffe "verloren gehen".
- Die Berechnung erfolgt sequenziell und lokal, ist aber völlig *frei* in der Rechenrichtung. Das heißt, die Rechenrichtung hängt nicht von der Stoffstromrichtung ab, sondern nur davon, wo Informationen bereits bekannt sind und wo fehlende Informationen errechnet werden müssen.
- Mit Stoffstromnetzen kann sowohl eine *Periodenrechnung* als auch eine *Stückrechnung* durchgeführt werden. Sie eignen sich somit gleichermaßen für Produktökobilanzen und betriebliche Ökobilanzen.
- Innerhalb der Stoffstromnetze lassen sich auch komplexe *Stoffrekursionen* oder Recyclingschleifen abbilden und berechnen.

4 Bilanzierungssoftware Umberto[®]

Umberto[®] wurde in einer Kooperation entwickelt von:

- ifu Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH
- ifeu-Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH

Bei der Erstellung einer Stoffstromanalyse oder Ökobilanz fallen im wesentlichen drei Aufgabenbereiche an:

- Modellierung des zu untersuchenden Stoffsystems
- Berechnung unbekannter Stoffströme und -bestände
- Darstellung von Stoff- und Energiestromdaten sowie Bewertung

4.1 Modellierung des zu untersuchenden Stoffsystems

In Umberto[®] werden Stoffe und Energieformen unter dem Begriff *Material* zusammengefaßt. Alle Materialien, die in einem Bilanzierungsvorhaben auftreten, werden zentral in einer Materialliste

⁶ SCHMIDT, SCHORB(1995)

geführt, welche hierarchisch strukturiert sein kann. Alle Mengenangaben zu Materialbeständen oder -strömen werden intern in den Basiseinheiten kg oder kJ geführt und verrechnet.

Der gesamte Datenbestand ist in Projekte, Szenarien und Perioden strukturiert. Diese Strukturierung ist auch für die Datenerfassung und -auswertung maßgeblich. Ein *Projekt* umfaßt dabei alle Informationen, die für eine thematisch abgegrenzte Energie- und Stoffstromanalyse notwendig sind. Es beinhaltet eine Materialliste und beliebig viele Szenarien. Jedes *Szenario* enthält genau ein Stoffstromnetz und alle zeitunabhängigen Daten (z.B. Angaben zu den Prozessen) sowie eine beliebige Zahl von Perioden. Einer *Periode* wiederum sind alle zeitabhängigen Daten zugeordnet, die sich auf den Zeitraum einer Periode beziehen (z.B. Ströme und Bestände).

Um ein zu untersuchendes System als Stoffstromnetz zu modellieren, sind folgende Ebenen zu bearbeiten:

- Aufbau der Netzstruktur (Strukturebene)
- Spezifikation der Netzelemente (Spezifikationsebene)
- Dokumentation (Dokumentationsebene)

Die Strukturebene und die Spezifikationsebene stehen in Beziehung zueinander und beschreiben zusammen das Stoffstromnetz.

Die *Netzstruktur* wird aus den in Kap. 3.2 beschriebenen Elementen gebildet, also aus Transitionen, Stellen und/oder Verbindungen.

Die *Spezifikation* der Netzelemente ermöglicht quantitative Angaben zu Art und Umfang der Stoff- und Energieflüsse. Die *Spezifikation der Stellen* erfolgt durch ihre Anfangsbestände. Zur *Spezifikation der Verbindungen* werden die Mengen der dort fließenden Materialien angegeben.

Die *Transitionsspezifikationen* beinhalten Angaben zur Art der Materialien, die als Input bzw. Output eines Prozesses auftreten, sowie Angaben zu den Mengenverhältnissen zwischen den einzelnen Strömen, die durch den Prozeß verursacht werden. Die Angaben zu den Abhängigkeiten können in Form von Verhältniszahlen oder Funktionsdefinitionen gemacht werden. Für eine Reihe von Prozessen, die im Rahmen der Modellierung von Stoffstromsystemen wiederholt in Stoffstromnetzen zu berücksichtigen sind, ist die Spezifikation in der *Prozeßbibliothek* enthalten.

4.2 Berechnung unbekannter Stoffströme und -bestände

Es können sowohl *Materialflüsse im Betrachtungszeitraum* als auch *Materialbestände am Ende des Betrachtungszeitraumes* berechnet werden. Wurden unbekannte Flüsse oder Endbestände ermittelt, so werden die Verbindungs- bzw. Stellenspezifikationen um diese Angaben automatisch ergänzt. Dabei werden sowohl die Materialien als auch die Materialmengen eingetragen.

Das Berechnungsverfahren arbeitet vollständig *lokal*, immer bezogen auf eine einzelne Transition oder eine einzelne Stelle. Dieser Ansatz reduziert die Voraussetzungen für die Anwendung des Berechnungsverfahrens und erlaubt die Durchführung der Berechnungen, auch wenn die Spezifikationen in einem Stoffstromnetz noch nicht vollständig sind.

Anzumerken ist außerdem, daß die *Berechnungsrichtung* nicht auf die Richtung der Materialströme festgelegt ist. Der Berechnungsalgorithmus kann sowohl entgegen der Stromrichtung arbeiten als auch in Richtung der Materialströme. Generell ist festzustellen, daß eine Berechnung in Richtung der Materialströme meist bei Betriebsbilanzen auftritt, während die Berechnung entgegen der Materialströme für Produktbilanzen charakteristisch ist.

Umberto® erlaubt zudem die Modellierung von *Materialrückführung* und *Recyclingloops*. Die unmittelbare Abbildung von Recyclingstrukturen in entsprechende Netzstrukturen ist möglich.

4.3 Darstellung von Stoff- und Energiestromdaten sowie Bewertung

Die wichtigste Auswertungs- und Anzeigemöglichkeit für Sachbilanzdaten wird durch die Zusammenstellung und Anzeige von Bilanzen im *Umberto Inventory Inspector* bereitgestellt. Damit ist sowohl die vollständige Bilanzierung von Stoffstromnetzen möglich als auch die Bilanzierung einzelner Prozesse.

Mittels der Programmkomponente *Valuation System Editor* können Kennzahlensysteme definiert werden. Durch die Anwendung von Bewertungs- oder Kennzahlensystemen auf Sachbilanzdaten ermöglicht Umberto[®] somit eine Bewertung der Sachbilanzergebnisse.

5 Kläranlage Osnabrück

5.1 Verfahren zur Abwasserreinigung

Bei den technischen Verfahren der Abwasserreinigung handelt es sich grundsätzlich um eine Reihe von Maßnahmen, bei denen der natürliche Reinigungsprozeß der Gewässer, für den sonst viele Kilometer Fließstrecke nötig wären, mittels mechanischer, biologischer und chemischer Vorgänge, die auf kleinerer Fläche und in kürzerer Zeit als in der Natur ablaufen, nachgeahmt und so weit wie möglich optimiert wird.

Ein Schema der wichtigsten Prozesse der Kläranlage Osnabrück zeigt Abb. 5.1.

5.1.1 Mechanische Reinigung (1. Stufe)

Diese Stufe umfaßt eine *Grobreinigung* sowie das Abscheiden absetzbarer Schmutzstoffe (*Sedimentation*), wobei etwa 30 – 35% der organischen Substanzen (bezogen auf den BSB-5) zurückgehalten werden. Das Schmutzwasser durchläuft Rechen, Sandfang sowie das Absetzbecken zur Vorklärung. Das sedimentierte Material wird *Rohschlamm*, *Primärschlamm* oder auch *Faulsumpf* genannt und dem Faulturm zugeführt.

5.1.2 Aerobe biologische Reinigung (2. Stufe)

Etwa zwei Drittel der organischen Schmutzfracht sind gelöste oder fein verteilte (suspendierte bzw. kolloid gelöste) Stoffe, die sich nicht absetzen. Sie sind jedoch dem *aeroben Abbau* durch die im Wasser bereits vorhandenen Bakterien gut zugänglich, so daß sich diese Biomasse rasch vermehrt, wenn sie mit den Nährstoffen und dem reichlich benötigten Sauerstoff optimal in Kontakt kommt.

Im wesentlichen stehen in dieser, dem natürlichen Selbstreinigungsprozeß des Wassers nachgeahmten Reinigungsstufe zwei Verfahren zur Verfügung:

- Tropfkörperanlage (wird hier nicht weiter ausgeführt)
- Belebungsanlage

Beim *Belebungsverfahren* werden im *Belebungsbecken* Abwasser und Belebtschlamm gemischt und intensiv belüftet. Die *Belebtschlammflocke* besteht aus einer schwammig aufgebauten, durch

polysaccharidartige Ausscheidungen zusammengehaltene (koagulierten) Lebensgemeinschaft von fakultativ aeroben Bakterien, hauptsächlich Streptokokken und Stäbchenbakterien, sowie Protozoen, Pilzen und Hefen.

Die bakterielle Biomasse nimmt im Belebungsbecken die verwertbaren organischen Abwasserinhaltsstoffe auf: Organischer Kohlenstoff wird entweder im Stoffwechsel oxidiert (veratmet, dissimiliert) oder in neue Zellmasse überführt (assimiliert). Organische C-Verbindungen werden zu etwa 70% assimiliert, d.h. die Produktion an Belebtschlamm ist beachtlich. Der biologische Abbau verläuft sehr rasch. In der Regel sind schon nach 30 bis 34 Minuten etwa 80% der leicht abbaubaren Substanzen abgebaut.

Im Nachklärbecken werden die Belebtschlammflocken abgesetzt und als aktive und bereits optimal an das Abwasser adaptierte Biomasse erneut in das Belebungsbecken rückgeführt. Der *Überschußschlamm* wird dem Faultrum zugeführt. Das Abwasser fließt in die Schönungsteiche, von dort weiter in den Vorfluter.

Ganz allgemein ist die Reinigungsleistung biologisch arbeitender Anlagen um so besser, je geringer die Nahrungsmenge, d.h. die Masse der für die Mikroorganismen verwertbaren organischen Substanzen, pro Zeit und verfügbarer Masse an Belebtschlamm gewählt wird. Dieser Quotient wird als Schlammbelastung B_{TS} bezeichnet [kg/(kg*d)].

5.1.3 Weitergehende Reinigung durch Phosphor- und Stickstoffelimination

Die Kombination chemischer und biologischer Verfahren verbessert die Reinigung, um den Schutz des Vorfluters zu gewährleisten und die gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen. An dieser Stelle werden die Verfahren genannt, die in der Kläranlage Osnabrück zum Einsatz kommen.

Chemische Phosphorelimination

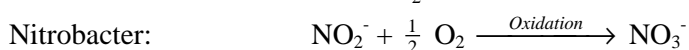
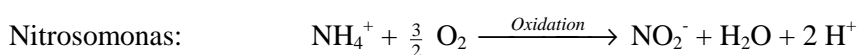
Die chemische Fällung durch eine $FeCl_2/FeSO_4$ -Lösung bewirkt eine weitgehende Entfernung von Phosphor. Außerdem erfolgt die Elimination von Bakterien und Viren, von suspendierten und kolloid gelösten Stoffen sowie von biologisch resistenten bzw. toxischen organischen und anorganischen Stoffen. Dabei ist nicht nur die Bildung schwerlöslicher Verbindungen, sondern auch die Ausfällung durch Adsorption ("Mitfällung") von Bedeutung. Die Fällungsmittelzugabe erfolgt im Bereich der biologischen Stufe und wird deshalb auch Simultanfällung genannt.

Biologische Phosphorelimination

Unterzieht man dem Belebtschlamm einem ständigen Wechsel von anaeroben und aeroben Verhältnissen, so zeigt sich, daß die Bakterien im anaeroben Milieu, das für sie eine Stresssituation darstellt, Phosphat freisetzen und im aeroben Milieu, also im Belebungsbecken, Phosphat aufnehmen. Dies macht man sich zu Nutze, um z.B. im Nebenstromverfahren den Rücklaufschlamm anaerob zu behandeln und so Phosphat anzureichern und anschließend chemisch ausfällen zu können.

Nitrifikation

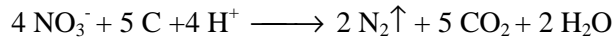
Die unter aeroben Bedingungen ablaufende Nitrifikation ist die Stickstoffoxidation durch Nitrifikanten unter Sauerstoffzehrung. Litoautotrophe Mikroorganismen, die anorganischen Kohlenstoff verwerten, oxidieren Ammonium NH_4^+ zu Nitrit NO_2^- und dieses weiter zu Nitrat NO_3^-



Da sowohl Nitrifikation als auch Belebung aeroben Bedingungen verlangen, laufen beide Prozesse im Belebungsbecken ab.

Denitrifikation

Die unter anaerobe Bedingungen ablaufende Denitrifikation ist die Reduktion des Nitrats NO_3^- zu gasförmigem Stickstoff:



Hierbei werden organische Kohlenstoff-Verbindungen bakteriell mit Nitrat-Sauerstoff zu CO_2 oxidiert.

Bei der vorgeschalteten Denitrifikation durchfließt das zu reinigende Wasser zuerst das anaerobe Denitrifikationsbecken und wird im Anschluß daran in das aerobe Belebungsbecken geleitet.

5.1.4 Schlammbehandlung, Faulgas und Klärschlamm

Der Primärschlamm des Vorklärbeckens sowie der Überschussschlamm des Nachklärbeckens enthalten nur etwa 2 - 5% Feststoffe, der Rest ist Wasser. Durch Zugabe von Branntkalk CaO wird der Schlamm entkeimt. Die dadurch bewirkte Anhebung des pH-Werts auf $\text{pH} \sim 11$ hat eine weitgehende Abtötung von Bakterien zur Folge. Die Kalkung führt außerdem zu einer Konditionierung für die Schlammmentwässerung.

Im Faulturm schließt sich sodann die *anaerobe Schlammstabilisierung* an. Hier wird der Schlamm unter Luftabschluß dem anaeroben Abbau unterworfen. Dabei sind sowohl Gärungsprozesse (anaerober Abbau von C-Verbindungen, z.B. Kohlenhydrate) als auch Fäulnisprozesse (anaerober Abbau von N-Verbindungen, z.B. Eiweiß) maßgebend. Das entstehende *Faul- bzw. Klärgas* (ca. 60 – 70% Methan CH_4 , 40-30% CO_2 , wenig CO) wird in Gasbehältern gespeichert und kann zur Energiegewinnung benutzt werden.

Klärschlamm ist von schwarzer Farbe und schwach erdigem Geruch, er enthält noch einen hohen Wasseranteil. Durch maschinelle Entwässerungsverfahren, z.B. Druckfiltration, erhält man Klärschlamm mit ca. 40 – 45% Trockensubstanz, dies entspricht in etwa dem Feuchtigkeitsgehalt trockener Erde. Die Beseitigung der anfallenden Schlammengen als wertvoller landwirtschaftlicher Dünger wird oftmals erschwert durch angereicherte Schwermetalle und persistente organische Stoffe. Die Anwendung von Klärschlämmen unterliegt gesetzlichen Anforderungen (Abfallgesetz 1986 und Klärschlammverordnung).

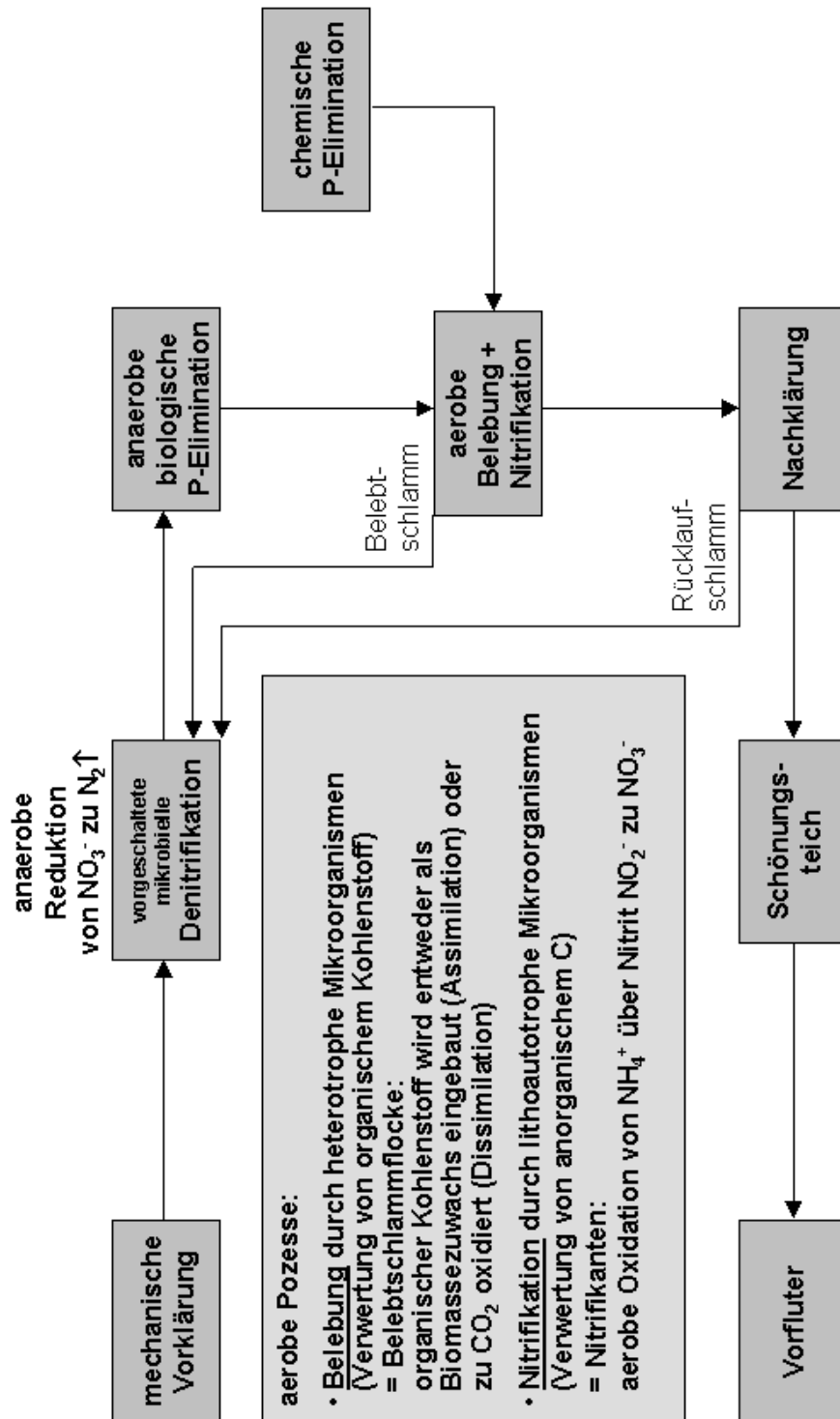


Abb. 5.1: Kläranlage Osnabrück – Schema der wichtigsten Prozesse

5.2 Beschreibung der Kläranlage Osnabrück

5.2.1 Geschichtlicher Überblick

bis 1910	Direkteinleitung des ungeklärten Abwassers in die Hase
1912	Bau einer Siebtrommelanlage zur Zurückhaltung der größten Verschmutzung
1935	Bau einer Rechenanlage mit mechanischem Absetzbecken
1955 - 58	Neubau einer zweistufigen Belebtschlammanlage
1968	Erweiterung des Belebtschlammbeckens
1970	Bau des ersten Faulturms und eines Regenrückhaltebeckens
1994	Vergrößerung der biologischen Anlage mit Einrichtung der dritten Reinigungsstufe zur Phosphor- und Stickstoffelimination
in Planung	zweiter Faulturm sowie zwei weitere Blockheizkraftwerke

5.2.2 Kanalisationssystem

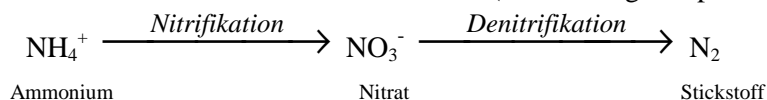
Die Zuleitung erfolgt zu

- *5% über Mischkanalisation.* Das anfallende Niederschlagswasser wird zusammen mit den Schmutzwässern in die Kanalisation geleitet.
Nachteil: Bei starken Regenfällen kann die Kläranlage nicht das gesamte Mischwasser aufnehmen, so daß ein Teil des Mischwassers direkt in den Vorfluter abfließt.
Vorteil: Kanalreinigung entfällt, da bei Regengüssen die Kanäle durchgespült werden.
- *95% über Trennkanalisation.* Niederschlagswasser und Schmutzwasser werden in zwei voneinander getrennten Kanalisationssystemen abgeführt.

5.2.3 Kurzdarstellung

Typ: "Weitergehende Kläranlage". Dies beinhaltet:

- Biologische Kläranlage (Belebtschlammverfahren) (Prozesse vgl. Kap. 5.1.2)
- Klärgasnutzung durch Verbrennung in vier Blockheizkraftwerken (BHKW) (Prozesse vgl. Kap. 5.1.4)
- chemische und biologische Phosphatelimination (Prozesse vgl. Kap. 5.1.3)
- Nitrifikations- und Denitrifikationsstufe (Prozesse vgl. Kap. 5.1.3):



Angeschlossene Einwohner: 140.000
Einwohnergleichwert (EWG) 250.000

EWG = Abwasserbelastung, die ein Einwohner pro Tag verursacht

Standort der Meßpegel:

Zufluß (= Schmutzfracht): nach Vorklärbecken
Abfluß: nach Teich

5.2.4 Datengewinnung

Die nachfolgenden Daten wurden in persönlichen Gesprächen (5.3.98, 6.4.98) übermittelt und durch den Jahresbericht 1996 ergänzt.

Als Ansprechpartner sind zu nennen:

Klärwerk OS-Eversburg, Klöcknerstr. 6, 49090 Osnabrück		Tel. 323-1400
• Betriebstechnik, Klärtechnik:	Herr Rahe	Tel. 323-1435
• Laborleitung:	Frau Röse	Tel. 323-1435

5.2.4.1 Input und Output

Beim Betrieb der Kläranlage fallen die in Tabelle 5.1 aufgeführten Input- und Output-Ströme an.

Tab. 5.1: Input- und Output-Ströme der Kläranlage Osnabrück (1996)

Abfluß 1996	
Trockenwetterabfluß = Jahresschmutzwassermenge	13.987.700 m ³ / a = 13.987.700.000 l / a
Naßwetterabfluß	15.629.199 m ³ / a
Input Stoff + Energie 1996	
Strombezug netto (= Strombezug extern – Einspeisung)	2.942.953 kWh _{el} = 0,21 kWh _{el} / m ³ Abwasser
Kalk CaO zur Schlammkonditionierung	16 kg Kalk / m ³ ausgefaultem Klärschlamm = 0,2075 kg / m ³ Abwasser
Chlor	wird nicht verwendet
Fällungsmittel FeCl ₂ -FeSO ₄ -Lösung zur Phosphatelimination	kontinuierliche Einleitung von 20 l / h = 0,0125 kg / m ³ Abwasser
Fettzufuhr aus lebensmittelverarbeitender Industrie und Großküchen	100 m ³ / Tag = 0,0026 m ³ / m ³ Abwasser
Output Stoff + Energie 1996	
Schlamm, nicht entwässert = Rohschlamm	181.360 m ³ / a = 0,0129 m ³ Rohschlamm / m ³ Abw. ≅ 1,3% des Abwasser
Klärschlamm, 40 % TS zur landwirtschaftlichen Ausbringung	24.028,5 t Trockensubstanz / a = 1,72 kg Klärschlamm (TS) / m ³ Abw.
Klärgas	2.998.582 m ³ / a ≅ 0,2144 m ³ Klärgas / m ³ Abwasser
Heizwert Klärgas	23,245 MJ/m ³ Klärgas = 6,457 kWh _{gesamt} /m ³ Klärgas
Zusammensetzung Klärgas	
CH ₄	65%
CO ₂	35%
Emissionen durch Klärgasverbrennung (SO ₂ , NO _x , Staub, CO ₂ regenerativ)	keine Angaben

5.2.4.2 Energiebilanz

Die Verbrennung des Klärgases erfolgt in vier Blockheizkraftwerken (Typ: aufgeladene Gas-Otto-Motoren mit schadstoffarmen Magermischbetrieb): Hierbei werden Strom und Wärme mit folgendem Wirkungsgrad η erzeugt:

Gesamtleistung:	3.424 kW		
Leistung pro Block:	856 kW	setzt sich zusammen aus:	Wirkungsgrad h
		260 kW _{elektrisch}	30,4%
		520 kW _{thermisch}	60,7%
		76 kW _{Verluste}	8,9%

Der erzeugte Strom wird weitgehend selbst genutzt, zu einem geringen Anteil jedoch auch in das Stadtwerkenetz eingespeist. Die erzeugte Wärme wird teilweise benötigt zur Heizung der Gebäude, zur Warmwasserbereitung und zum Temperieren des Faulturms. Der nicht verwendete Wärmeüberschuß wird an die Atmosphäre abgegeben. Somit läßt sich die in Tabelle 5.2 folgende Energiebilanz aufstellen.

Tab. 5.2: Energiebilanz der Kläranlage Osnabrück (1996)

Energiebilanz 1996	
Strombezug extern	3.088.191 kWh _{el}
Strombezug netto	2.942.953 kWh _{el}
Klärgasproduktion	2.998.582 m ³
Heizwert von Klärgas	6,457 kWh _{gesamt} /m ³ Klärgas
Energiegehalt Klärgas	19.362.000 kWh
Verbrennung von Klärgas im BHKW	
Wärmeerzeugung (mit h = 60,7%)	11.752.734 kWh
davon:	
genutzte Wärme (h = 30,58%)	5.920.000 kWh
Wärme-Emission (h = 30,12%)	5.832.734 kWh
Stromerzeugung (mit h = 30,4%)	5.886.048 kWh
Verluste (mit h = 8,9%)	1.723.218 kWh
Verstromung von Klärgas	1,960 kWh _{elektrisch} /m ³ Klärgas

5.2.4.3 Analytik

Im Labor der Kläranlage werden die chemischen Parameter gemessen. Diese Werte sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tab. 5.3: Wasseranalyse der Kläranlage Osnabrück (1996)

Parameter	Input	Output	Output/Input
BSB-5	193,0 mg/l	3,7 mg/l	0,0192
CSB	418,0 mg/l	38,6 mg/l	0,092
AOX	96,0 mg/l	45,6 mg/l	0,475
Phosphate	5,3 mg/l	0,5 mg/l	0,094
Ammonium <small>nach Vorklämung</small>	44,6 mg/l	2,0 mg/l	0,0448
Nitrat	nicht gemessen	6,1 mg/l	
Nitrit	nicht gemessen	0,2 mg/l	
N _{Gesamt}	53,52 mg/l	8,3 mg/l	0,155
pH	Zulauf Biologie 8,2	Teich 7,3	
Temp	Zulauf Biologie 17,5		

Erläuterungen:

BSB-5

- = Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen, bei 20°C
- Einheit: mg O₂ / l Abwasser oder g O₂ / m³ Abwasser
- Organisch gebundener Kohlenstoff wird durch mikrobielle Stoffwechselprozesse in CO₂ überführt. Je höher die abzubauenende Menge an Schmutzstoffen ist, desto größer ist die beim biologischen Abbau verbrauchte Sauerstoffmenge. Der BSB-5 ist ein Parameter für leicht abbaubare Stoffe.

CSB

- = Chemischer Sauerstoffbedarf
- Einheit: mg O₂ / l Abwasser
- Durch Zugabe von Kaliumdichromat K₂Cr₂O₇ werden organische und anorganische Inhaltsstoffe oxidiert. Aus dem Chromat-Verbrauch wird der O₂-Verbrauch berechnet. Der CSB erfaßt auch biologisch nicht abbaubare Stoffe.

AOX

- = Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
- = halogenierte Kohlenwasserstoffe

Nitrat und Nitrit im Zulauf werden nicht gemessen, da organischer Stickstoff in der Kanalisation nahezu vollständig in NH₄⁺ umgewandelt wird

N_{Gesamt} im Zulauf wird nicht gemessen, sondern berechnet.
Faustformel: N_{Gesamt} = NH₄⁺ * 1,2

Schwermetallionen sind nach Aussage der Laborleitung nicht in auffälligem Maße vorhanden und müssen somit nicht gesondert ausgefällt werden. Eine pH-Wert-Regulierung durch Zugabe von NaOH oder HCl ist ebenfalls nicht erforderlich.

6 Umberto[®]-Transitionsmodule

6.1 Modulbibliothek

Umberto[®] beinhaltet eine Bibliothek von Transitionsmodulen. Diese Module stellen Prozeßdefinitionen dar, die zur Spezifikation der Transitionen verwendet werden können. Hier werden *Standardprozesse aus unterschiedlichen Einsatzbereichen* beschrieben, z.B. Energieerzeugung, Transport, Entsorgung. In der Bibliothek sind sowohl Datensätze für einzelne Prozesse als auch ganze Prozeßketten abgelegt.

Ein Transitionsmodul der Bibliothek repräsentiert das Umweltwissen einer zurückliegenden Studie. Das in der Spezifikation steckende Wissen kann von einer Vielzahl von Anwendern für eine Vielzahl von Anwendungsfeldern genutzt werden. Das Ergebnis einer Studie geht somit in Form eines *Submodells*, einer Idealisierung, in andere Modelle ein.

Transitionen, für die keine eigenen Daten zur Verfügung stehen, können hierbei durch gemittelte oder geschätzte Werte spezifiziert werden. Die Prozesse werden – mit Ausnahme der Energieerzeugung - aus Daten des ifeu-Instituts errechnet. Bei der Energieerzeugung werden die

Daten aus dem "Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme" (GEMIS), das in Deutschland nahezu ein Standard für Energieerzeugungssysteme ist, übernommen bzw. ausgewertet.

6.2 Transitionsmodule "Kläranlagen"

Die Prozeßbibliothek enthält die Gruppierung "Abfallbehandlung", u.a. mit der Untergruppe "Kläranlagen". Hier finden sich folgende Standardtypen:

- mechanische Kläranlage:
Dieser Typ besitzt nur eine mechanische Reinigungsstufe, die auf physikalischen Eigenschaften beruht und die Rückhaltung der im Abwasser enthaltenen absetzbaren Stoffe und deren Stabilisierung umfaßt.
- biologische Kläranlage:
Dieser Typ besitzt zusätzlich eine biologische Stufe. In dieser wird die Tätigkeit von Mikroorganismen genutzt, um organische Inhaltsstoffe von Abwässern zu oxidieren, d. h. abzubauen. Gleichzeitig wird bei diesem Abbau Klärschlamm gebildet. Dieser wird bei dem hier beschriebenen Anlagentyp anaerob behandelt. Das gebildete Klärgas wird in Gasmotoren thermisch genutzt. Es sei allerdings darauf verwiesen, daß nur ca. 46% der Anlagen tatsächlich Schlamm anaerob behandeln und Klärgas nutzen.
- weitergehende Kläranlage
Dieser Typ beruht auf der biologischen Anlage mit Klärgasnutzung, hat aber zusätzlich eine Phosphatfällungs- und Denitrifikationsstufe, um Phosphor- und Stickstofffrachten zu verringern.

Neben dieser Differenzierung nach Anlagentypen wurde eine weitere Unterscheidung getroffen. Sie betrifft die Einbeziehung der Umwelteinflüsse der externen Stromerzeugung, der Heizölnutzung sowie der Produktion der Materialien Chlor und Kalk, die in den Anlagen verbraucht werden. Es werden zwei Gruppen von Datensätzen präsentiert: *mit und ohne Vorkette*, d. h. mit und ohne die Einbeziehung der genannten zusätzlichen Datensätze.

Alle beschriebenen Anlagen beruhen auf der durchschnittlichen Reinigungseffizienz *kommunaler Anlagen*. Daher sollten die Datensätze auch nur für in solchen Anlagen gereinigte Abwässer genutzt werden. Zusätzlich wird angenommen, daß die organischen Abwässer *biogenen* Ursprungs sind. Das bei der Klärgasnutzung entstehende Kohlendioxid kann somit als *regenerativ* angesehen werden.

Zur *Dokumentation* der Transitionen dient:

- IFEU; IFU (1996): Umberto-Handbuch, Version 2.0, Heidelberg
Leider reicht dies längst nicht aus, wenn man die in den Transitionen modellierten Prozesse nachvollziehen möchte.

Die transitionsimmanenten Annahmen und Quellenangaben der Durchschnittswerte sind genannt in:

- IFEU (1994): Endbericht Ökobilanz für Verpackungen, Teilbericht Energie – Transport – Entsorgung, Heidelberg
Allerdings werden auch hier nicht sämtliche Parameter aufgeschlüsselt, so daß zum endgültigen Verständnis doch noch einiges an Recherche und "Knobelarbeit" geleistet werden muß.

Anzumerken ist, daß die Bibliotheksmodule auch *Fehler* enthalten können. In der Transition "Biologische Kläranlage o.V." wurden die Formeln zur Beschreibung des Chlor- und Kalkumsatzes versehentlich vertauscht. Dieser Fehler wurde dem ifeu-Institut mitgeteilt.

Im nachfolgenden Kapitel 6.3 wird das Transitionsmodul “Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette” beschrieben.

6.3 Transition “Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette”

Die folgenden Tabellen erläutern die Spezifikation der Standard-Transition mit den verwendeten Materialien, Variablen, Parametern und Funktionsdefinitionen. Die Notation aus Umberto® wurde hierbei durchgehend übernommen.

6.3.1 Materialien

Die umgesetzten Stoffe und Energieformen sind unter dem Begriff *Material* zusammengefaßt. Mit den Variablen X_i werden die Materialien des Inputs, mit den Variablen Y_i die Materialien des Outputs bezeichnet (Tab. 6.1).

Tab. 6.1: Materialien der Transition “Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette”

Input			Output		
Var	Material	Dim	Var	Material	Dim
X01	Abwasser, unspezifiziert	kg	Y01	Abwasser, geklärt	kg
X02	Energie, elektrisch	kJ	Y02	Nitrat	kg
X03	Energie, thermisch	kJ	Y03	Ammonium	kg
X04	Chlor	kg	Y04	Phosphorverbindungen	kg
X05	Kalk	kg	Y06	AOX	kg
X06	Fällungsmittel	kg	Y07	CSB	kg
X07	Ammonium	kg	Y08	BSB-5	kg
X08	Phosphorverbindungen	kg	Y09	Staub	kg
X09	AOX	kg	Y10	Kohlendioxid, reg.	kg
X10	CSB	kg	Y11	NO _x	kg
X11	BSB-5	kg	Y12	Schwefeldioxid	kg
			Y13	Klärschlamm 20% TS	kg

6.3.2 Parameter

Als Datengrundlage der in Tabelle 6.2 aufgeführten Parameter dienen Durchschnittswerte der BRD.

Tab. 6.2: Parameter der Transition “Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette”

Reinigungseffizienz der Kläranlage	Konz. im Zulauf / Konz. im Ablauf:	
BSB-5	0,016	
CSB	0,066	
Ammonium	0,29	
Phosphorverbindungen	0,01	
AOX	0,4	
Verbrauch	Wert	Dim
Strom aus Netz	0,324	kWh _{el} / m ³ Abwasser
Wärme aus Heizöl	0,13464	MJ / m ³ Abwasser
Kalk (als CA(OH) ₂)	0,075	kg / m ³ Abwasser
Chlor	0,015	kg / m ³ Abwasser
Emissionen aus Klärgasverbrennung	Wert	Dim
Staub	2	kg / TJ Klärgas

Kohlendioxid, reg.	91700	kg / TJ Klärgas
NO _x	74	kg / TJ Klärgas
Schwefeldioxid	184	kg / TJ Klärgas

Die Größen, die die Inhaltstoffe des zugeführten Abwassers beschreiben, müssen vorgegeben werden:

X01	Abwasser, unspezifiziert
X07	Ammonium
X08	Phosphorverbindungen
X09	AOX
X10	CSB
X11	BSB-5

6.3.3 Funktionen

Tabelle 6.3 zeigt die Funktionsdefinitionen im Überblick. Im Anschluß daran sind die Formeln nochmals einzeln aufgeführt und kommentiert.

Tab. 6.3: Funktionen der Transition "Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette"

Input	
zu klärender Input	$L1 = (x01+x07+x08)/1000$
Energie, elektrisch	$X02 = 11*0.324*3.6*1000$
Energie, thermisch	$X03 = 11*0.022*2*3.6*1000*0.85$
Chlor	$X04 = 11*15/1000$
Kalk	$X05 = 11*75/1000*0.756861$
Fällungsmittel	$X06 = x08*3/0.219$
Output	
Klärschlamm Trockensubstanz	$L7 = x11*0.984$
Klärschlamm	$Y13 = 17+17*4$
Abwasser, geklärt	$Y01 = x01-17*4$
Ammonium	$Y03 = x07*0.29$
Phosphorverbindungen	$Y04 = x08*0.01$
AOX	$Y06 = x09*0.4$
CSB	$Y07 = x10*0.066$
BSB-5	$Y08 = x11*0.016$
Nitrat	$Y02 = x07*0.776486*0.05*4.4268$
Emissionen durch Klärgasverbrennung	
Klärgas	$L4 = 11*0.186*0.7*23.076/1e6$
Staub	$Y09 = 14*2$
CO ₂ , regenerativ	$Y10 = 14*91700$
NO _x	$Y11 = 14*74$
SO ₂	$Y12 = 14*184$

Input (Transition "Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette")

zu klärender Input $L1 = (x01+x07+x08)/1000$ [m³]

zu klärender Input [m³] = (Abwasser, unspezif. [kg] + NH₄⁺ [kg] + P [kg]) / 1000

L1 steht für den zu klärenden Input und setzt sich zusammen aus dem zugeführten Abwasser sowie den darin gelösten Ammonium- und Phosphorverbindungen. L1 wird hierbei auf $[m^3]$ umgerechnet ($1m^3 = 1000 l = 1000 kg$).

Energie, elektrisch **X02 = $11 \cdot 0.324 \cdot 3.6 \cdot 1000$** **[kJ]**

Energie, elektrisch [kJ] (externer Bezug)
= zu klärender Input $[m^3] \cdot 0,324 [kWh_{el} / m^3 \text{ Abwasser}] \cdot 3600$

X02 steht für den zugekauften Strom.

Als Gesamt-Energiebedarf werden $0,554 kWh / m^3$ Abwasser angenommen. Dies ist der doppelte Bedarf einer biologischen Kläranlage, da konservativ für die Bereitstellung von Strom und Öl ein Faktor 2 angesetzt wird.

Als Energieträgeranteile werden angenommen:

Heizöl: $8,1\% \cong 0,044 kWh_{Heizöl} / m^3 \text{ Abwasser}$

Strom: $91,9\% \cong 0,51 kWh_{el} / m^3 \text{ Abwasser}$

Strom setzt sich zusammen: (Bezug = 91,9 %)

zugekaufter Strom: $60,1\% \cong 0,333 kWh_{el} / m^3 \text{ Abwasser}$

Strom aus Faulgas $31,8\% \cong 0,176 kWh_{el} / m^3 \text{ Abwasser}$

zur Umrechnung:

$1 J = 1 Ws$

$1 kJ = 1 kWs$

$3600 kJ = 1 kWh \Rightarrow 1 kJ = 2,78 \cdot 10^{-4} kWh$

$1 tJ = 10^9 kJ = 2,78 \cdot 10^5 kWh$

Energie, thermisch **X03 = $11 \cdot 0.022 \cdot 2 \cdot 3.6 \cdot 1000 \cdot 0.85$** **[kJ]**

Energie, thermisch [kJ]
= zu klärender Input $[m^3] \cdot 0.022 [kWh_{Heizöl} / m^3 \text{ Abwasser}] \cdot 2 \cdot 3.6 \cdot 1000 \cdot 0.85$

X03 steht für das zugekaufte Heizöl.

vgl. Energieträgeranteile:

Heizöl: $8,1\% \cong 0,044 kWh_{Heizöl} / m^3 \text{ Abwasser}$

Die Produktion von Wärme aus Heizöl ist mit einer Kesseffizienz von 85% berechnet.

Chlor **X04 = $11 \cdot 15 / 1000$** **[kg]**

Chlor [kg] = zu klärender Input $[m^3] \cdot 0,015 [kg / m^3 \text{ Abwasser}]$

vgl. Tab. 6.2: Verbrauch Chlor = $0,015 kg/m^3$ Abwasser

Kalk (als CaO) **X05 = $11 \cdot 75 / 1000 \cdot 0.756861$** **[kg]**

Kalk [kg] = zu klärender Input $[m^3] \cdot 0,075 [kg / m^3 \text{ Abwasser}] \cdot 0,756861$

vgl. Tab. 6.2: Verbrauch Kalk als $Ca(OH)_2 = 0,075 kg / m^3$ Abwasser

Der Parameter 0.756861 wird benötigt zur Umrechnung von $Ca(OH)_2$ in CaO:

Molekulargewicht		Molekulargewicht	
Ca	40,08	Ca(OH) ₂	74,096
O	16,00	CaO	56,08
H	1,008	→ CaO / Ca(OH) ₂	= 56,08 / 74,096 = 0,75686

Fällungsmittel für P-Elimination **X06 = x08*3/0.219** **[kg]**

Fällungsmittel [kg] = Phosphorverbindungen [kg] * b / z

b = molares Fällmittelverhältnis

b wird für eine wirkungsvolle Phosphorelimination mit Werten von 2 bis 5 angegeben. Der Gültigkeitsbereich dieser Beziehung erstreckt sich auf einen P-Eliminationsgrad von 30 – 90%. Da für die biologische Stufe der Kläranlage etwa ein P-Eliminationsgrad von 50% ausgegangen werden kann, wird der b-Wert mit 3 angenommen.

z = Umrechnungsfaktor, abhängig von Fe-Gehalt und Al-Gehalt

Für die modellhafte Berechnung des Fällmitteleinsatzes wird der Einsatz von FeCl₃ mit einem Fe-Gehalt von 20,7% und AlSO₄ mit einem Al-Gehalt von 9,08% zugrunde gelegt. Somit ist z = 0,555 * 0,207 + 1,148 * 0,0908 = 0,219

Output (Transition “Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette”)

Klärschlamm Trockensubstanz **L7 = x11*0.984** **[kg]**

Klärschlamm Trockensubstanz [kg] = BSB-5 [kg] * 0,984

Der Anfall von Klärschlamm Trockensubstanz in kg wurde gleich der abgebauten Menge an BSB-5 in kg angenommen.

vgl.: ifeu-Endbericht Tab. 7-3, S. 7-7: BSB-Input = 300 g/m³

vgl.: ifeu-Endbericht Tab. 7-4, S. 7-9: BSB-Output = 5 g/m³

→ abgebaute Menge = 295 g/m³ = 98,3% des BSB-Inputs

Klärschlamm **Y13 = l7+l7*4** **[kg]**

Klärschlamm [kg]

= KlärschlammTS (20%) [kg] + mit dem Schlamm ausgetragenes Wasser (80%) [kg]

Der abgegebene Klärschlamm hat einen Trockensubstanzanteil von 20%.

Abwasser, geklärt **Y01 = x01-l7*4** **[kg]**

Abwasser, geklärt [kg]

= Abwasser, unspezif. [kg] – mit dem Schlamm ausgetragenes Wasser (80%) [kg]

Das abgegebene geklärte Abwasser entspricht der Differenz zwischen dem Abwasserinput und dem mit dem Schlamm ausgetragenen Wasser.

Ammonium **Y03 = x07*0.29** **[kg]**

$$\text{OutputAmmonium [kg]} = \text{InputAmmonium [kg]} * 0,29$$

vgl. Tab. 6.2: Reinigungseffizienz bei Ammonium = 0,29

$$\text{Phosphorverbindungen} \quad \mathbf{Y04 = x08*0.01} \quad \mathbf{[kg]}$$

$$\text{OutputPhosphorverbindungen [kg]} = \text{InputPhosphorverbindungen [kg]} * 0,01$$

vgl. Tab. 6.2: Reinigungseffizienz bei Phosphorverbindungen = 0,01

$$\text{AOX} \quad \mathbf{Y06 = x09*0.4} \quad \mathbf{[kg]}$$

$$\text{OutputAOX [kg]} = \text{InputAOX [kg]} * 0,4$$

vgl. Tab. 6.2: Reinigungseffizienz bei AOX = 0,4

$$\text{CSB} \quad \mathbf{Y07 = x10*0.066} \quad \mathbf{[kg]}$$

$$\text{OutputCSB [kg]} = \text{InputCSB [kg]} * 0,066$$

vgl. Tab. 6.2: Reinigungseffizienz bei CSB = 0,066

$$\text{BSB-5} \quad \mathbf{Y08 = x11*0.016} \quad \mathbf{[kg]}$$

$$\text{Output BSB-5 [kg]} = \text{Input BSB-5 [kg]} * 0,016$$

vgl. Tab. 6.2: Reinigungseffizienz bei BSB-5 = 0,016

$$\text{Nitrat} \quad \mathbf{Y02 = x07*0.05*0.776486*4.4268} \quad \mathbf{[kg]}$$

$$\text{Nitrat [kg]} = \text{InputAmmonium [kg]} * 0,05 * 0,776486 * 4,4268$$

Bei der weitergehenden Reinigung mit Denitrifikation kann mit einem Wirkungsgrad der N-Elimination (Denitrifikation) von 95% gerechnet werden. Bezogen auf den NH_4^+ -Input (100%) fallen demnach 95% als N_2 -Output in die Atmosphäre und 5% als NO_3^- -Output im Überschussschlamm an.

Die Parameter 0.776486 und 4,4268 ergeben sich wie folgt:
Reinigungsleistung wird über den N-Gehalt beschrieben, deshalb

Molekulargewicht:

$$\text{NH}_4^+ \quad 18,042$$

$$\text{N} \quad 14,01 \quad \rightarrow \text{N} / \text{NH}_4^+ = 0,7765$$

$$\text{NO}_3^- \quad 62,01 \quad \rightarrow \text{NO}_3^- / \text{N} = 4,426$$



**Emissionen durch Klärgasverbrennung
(Transition "Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette")**

Klärgas **L4 = 11*(0.186*0.7)*23.076/1e6** **[TJ]**

Klärgas [TJ] = zu klärender Input [m³ Abwasser] * 0,1302 [m³ Klärgas / m³ Abwasser] * 23,076 [MJ / m³ Klärgas] * 10⁻⁶

Diese Formel beschreibt den Energiegehalt des im Faulturm anfallenden Klärgases.

Umrechnung in Tera-Joule 1 MJ = 10⁻⁶ TJ

Anfall von Klärgas: 0,1302 [m³ Gas / m³ Abwasser]
→ 1 m³ Gas entsteht aus 7,68 m³ Abwasser

Es werden max. 0,7 m³ Faulgas zur Erzeugung von 1 kWh Strom durch Gasmotoren angesetzt.
Bei Produktion von 0,13 m³ Gas/m³ Abwasser liegt die Eigenstromerzeugung durch Verstromung von Faulgas bei

0,186 kWh_{el} / m³ Abwasser
= 0,186 kWh_{el} / 0,13 m³ Klärgas
= 1,430 kWh_{el} / m³ Klärgas
= 5.148 kJ_{el} / m³ Klärgas

Heizwert von Klärgas:
23,076 MJ / m³ Klärgas
= 23.076 kJ / m³ Klärgas
= 6,42 kWh / m³ Klärgas
= 0,89 kWh / m³ Abwasser

Berechnung des Wirkungsgrades bei Klärgasverstromung:

Heizwert von Klärgas:	23.076 kJ / m ³ Klärgas	≅ 100,0%
Verstromung von Klärgas:	5.148 kJ _{el} / m ³ Klärgas	≅ 22,3%
Verluste		≅ 77,7%

Zusammensetzung des Klärgases:

CH ₄	59,8%
CO ₂	40,0%
H ₂ S	0,2%

Staub **Y09 = 14*2** **[kg]**

Staub [kg] = Klärgas [TJ] * 2 [kg / TJ Klärgas]

vgl. Tab. 7.2: Emissionen Staub = 2 kg / TJ Klärgas

Kohlendioxid, regenerativ **Y10 = 14*91700** **[kg]**

Kohlendioxid, reg. [kg] = Klärgas [TJ] * 91700 [kg / TJ Klärgas]

vgl. Tab. 6.2: Emissionen Kohlendioxid, reg. = 91700 kg / TJ Klärgas

NO_x **Y11 = 14*74** **[kg]**

$\text{NO}_x \text{ [kg]} = \text{Klär gas [TJ]} * 74 \text{ [kg / TJ Klär gas]}$

vgl. Tab. 6.2: Emissionen NO_x = 74 kg / TJ Klär gas

SO₂ **Y12 = 14*184** **[kg]**

$\text{SO}_2 \text{ [kg]} = \text{Klär gas [TJ]} * 184 \text{ [kg / TJ Klär gas]}$

vgl. Tab. 6.2: Emissionen SO₂ = 184 kg / TJ Klär gas

7 Modellierung der Kläranlage Osnabrück

7.1 Benutzerdefinierte Transitionsspezifikation

Die Bibliothek leistet dem Bilanzierer Hilfestellungen für die Modellierung von Prozessen, zu denen er keine genauen Daten zur Verfügung hat. In manchen Fällen interessiert jedoch nicht der Standardprozeß, sondern das *konkrete, spezielle System*.

Im folgenden wurde das Bibliotheksmodul "Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette" eigens auf die Kläranlage Osnabrück zugeschnitten. Dies geschah durch:

- Umschreiben der transitionsinternen Prozeßdefinitionen und Formeln
- Ergänzung durch zusätzlichen Formeln und Materialien
- Verwendung von Variablen als Platzhaltern für die prozeßsteuernden Größen
- Einsatz detaillierter und spezifischer Daten

7.2 Transition "Kläranlage Osnabrück"

An dieser Stelle folgen nun die verwendeten Materialien, Variablen, Parameter und Funktionsdefinitionen. Änderungen in Bezug auf die Standard-Transition sind kursiv dargestellt, nicht verwendete Spezifikationen werden durchgestrichen notiert.

7.2.1 Materialien

Die umgesetzten Stoffe und Energieformen sind unter dem Begriff *Material* zusammengefaßt. Mit den Variablen X_i werden die Materialien des Inputs, mit den Variablen Y_i die Materialien des Outputs bezeichnet (Tab. 7.1).

Tab. 7.1: Materialien der Transition “Kläranlage Osnabrück”

Input			Output		
Var	Material	Dim	Var	Material	Dim
X01	Abwasser, unspezifiziert	kg	Y01	Abwasser, geklärt	kg
X02	Energie, elektrisch	kJ	Y02	Nitrat	kg
X03	Energie, thermisch	kJ	Y03	Ammonium	kg
X04	Chlor	kg	Y04	Phosphorverbindungen	kg
X05	Kalk	kg	Y06	AOX	kg
X06	Fällungsmittel	kg	Y07	CSB	kg
X07	Ammonium	kg	Y08	BSB-5	kg
X08	Phosphorverbindungen	kg	Y09	Staub	kg
X09	AOX	kg	Y10	Kohlendioxid, reg.	kg
X10	CSB	kg	Y11	NO _x	kg
X11	BSB-5	kg	Y12	Schwefeldioxid	kg
			Y13	Klärschlamm 20% TS	kg
			Y14	<i>Energie-Emission, therm.</i>	<i>kJ</i>
			Y16	<i>N₂</i>	<i>kg</i>
			Y17	<i>Energieverluste, therm.</i>	<i>kJ</i>

Energie, thermisch (X03) entfällt, da weder Erdöl noch Erdgas als thermische Energieträger eingesetzt werden. Die erzeugte Wärmemenge der BHKW genügt, um den Wärmebedarf zu decken.

Chlor (X04) entfällt ebenfalls, da im Klärwerk Osnabrück weder Chlor noch Ozon zur Desinfektion eingesetzt wird.

Neu eingeführt wurden folgende Materialien:

Energie-Emission, thermisch (Y14) beschreibt die ungenutzte Wärme der BHKW, die als Abwärme an die Umgebung abgegeben wird.

Energieverluste, thermisch (Y17) stellt die Umwandlungsverluste dar, die sich in den BHKW ergeben.

N₂ (Y16) steht für den bei der Denitrifikation entstehenden elementaren Stickstoff, der ebenfalls in die Atmosphäre freigesetzt wird.

7.2.2 Parameter

Die Datengrundlage wurde bereits in Kapitel 5.2 erläutert. Um die *modulare Abgeschlossenheit* der Transition “Kläranlage Osnabrück” zu gewährleisten, wurden die *periodenbezogenen Parameter* in den Formeln durch Variablen ersetzt. So lassen sich die -in Abhängigkeit von der Berechnungsperiode variierenden- Größen problemlos einlesen. Diese Eigenschaft ist bei der Umberto-Transition® nicht gegeben. Die Variablenliste findet sich in Tabelle 7.2.

Tab. 7.2: Parameter der Transition "Kläranlage Osnabrück" (1996)

	Var	Parameter	Wert 1996	Dim
Reinigungseffizienz				
BSB-5	KY08	<i>BSB5-Entzug</i>	0,0192	
CSB	KY07	<i>CSB-Entzug</i>	0,092	
Ammonium	KY03	<i>Ammonium-Entzug</i>	0,0448	
Phosphorverbindungen	KY04	<i>P-Entzug</i>	0,094	
AOX	KY06	<i>AOX-Entzug</i>	0,475	
Verbrauch				
Strom aus Netz	KX02	<i>ElektrEnergieBezug</i>	0,21	<i>kWh_{el}/m³ Abwasser</i>
Wärme aus Heizöl				
Kalk (als CA(OH) ₂)	KX05	<i>KalkVerbrauch</i>	0,2075	<i>kg Kalk / m³ Abw.</i>
Chlor				
Fällungsmittel	KX06	<i>FällgsmVerbrauch</i>	0,0125	<i>kg Fällgsm. / m³ Abw.</i>
Emissionen				
Staub			2	kg / TJ Klärgas
Kohlendioxid, reg.			91700	kg / TJ Klärgas
NO _x			74	kg / TJ Klärgas
Schwefeldioxid			184	kg / TJ Klärgas
Sonstiges				
	KL4A	<i>Klärgasanfall</i>	0,2144	<i>m³ Gas / m³ Abw.</i>
	KL4B	<i>Klärgasheizwert</i>	23.245,2	<i>kJ / m³ Klärgas</i>
	KL7	<i>KlärschlammTS</i>	0,981	

Zu dem Emissionen aus der Klärgasverbrennungen konnten in der Kläranlage Osnabrück keine Angaben gemacht werden. Somit wurden die Werte der Standard-Transition übernommen. Alle Veränderungen der Standard-Transition sind kursiv dargestellt.

Die Eingabe der *periodenabhängigen Variablen* wurde über den *Input Monitor* organisiert. Diese Schnittstelle ermöglicht das direkte Einlesen der zu setzenden Daten aus einer Tabelle. Dazu wurde der *Input-Vektor Klärwerk_Parameter* definiert (Abb. 7.1) Somit werden Übertragungsfehler ausgeschlossen und die Handhabung deutlich erleichtert.

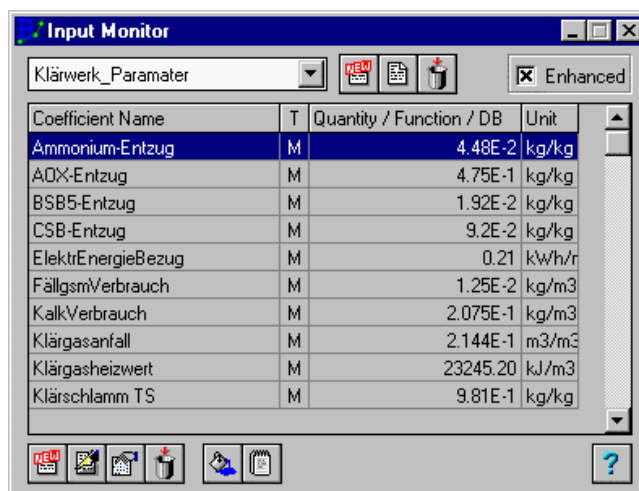


Abb. 7.1: Input-Vektor Klärwerk_Parameter(1996)

Die Größen, die die Inhaltstoffe des zugeführten Abwassers beschreiben, müssen vorgegeben werden (Tab. 7.3).

Tab. 7.3: Stoffeintrag in die Transition "Kläranlage Osnabrück" (1996)

Var	Material	Wert 1996	Dim
X01	Abwasser, unspezifiziert	13.987.700.000,00	kg
X07	Ammonium	623.851,42	kg
X08	Phosphorverbindungen	74.134,81	kg
X09	AOX	1.342,82	kg
X10	CSB	5.846.858,60	kg
X11	BSB-5	2.699.626,10	kg

7.2.3 Funktionen

Tabelle 7.4 zeigt die Funktionsdefinitionen im Überblick. Im Anschluß daran sind die Formeln nochmals einzeln aufgeführt. Die gegenüber der Standard-Transition veränderten oder neu eingeführten Formeln werden beschrieben, für die übrigen gelten die Erläuterungen aus Kapitel 6.3.3. Der Ersatz der Parameter in den Formeln durch Variablen wird im folgenden nicht weiter kommentiert.

Tab. 7.4: Funktionen der Transition "Kläranlage Osnabrück"

Input	
zu klärender Input	$L1 = (x01+x07+x08)/1000$
Energie, elektrisch	$X02 = I1 * KX02 * 3.6 * 1000$
Energie, thermisch	
Chlor	
Kalk	7.2.3.1.1.1.1.1.1 $X05 = I1 * KX05$
Fällungsmittel	$X06 = I1 * KX06$
Output	
Klärschlamm Trockensubstanz	$L7 = x11 * KL7$
Klärschlamm	$Y13 = I7 + I7 * 1.5$
Abwasser, geklärt	$Y01 = x01 - I7 * 1.5$
Ammonium	$Y03 = x07 * KY03$
Phosphorverbindungen	$Y04 = x08 * KY04$
AOX	$Y06 = x09 * KY06$
CSB	$Y07 = x10 * KY07$
BSB-5	$Y08 = x11 * KY08$
Nitrat	$Y02 = x07 * 0.776486 * 0.05 * 4.4268$
N_2	$Y16 = x07 * 0.95 * 0.776486 * 2$
Energieverluste, thermisch	$Y17 = I4 * 0.089 * 1e9$
Emissionen durch Klärgasverbrennung	
Klärgas	$L4 = I1 * KL4A * KL4B / 1e9$
Staub	$Y09 = I4 * 2$
CO ₂ , regenerativ	$Y10 = I4 * 91700$
NO _x	$Y11 = I4 * 74$
SO ₂	$Y12 = I4 * 184$
Energie-Emission, thermisch	$Y14 = I4 * 0.3012 * 1e9$
Interner Fluß	
Strom aus Klärgas	$Z01 = I4 * 0.304$
Wärme aus Klärgas	$Z02 = I4 * 0.3058$
Fett	$X12 = I1 * 0.0026$

Neu eingeführt wurden folgende Formeln:

Energie-Emission, thermisch (Y14) und *Energieverluste, thermisch (Y17)*, um so die vollständige Beschreibung der Energieumsetzung in den BHKW zu gewährleisten.

N₂ (Y16) vervollständigt die Stoffabgabe in Umwelt.

Die *internen Flüsse Z01, Z02 und X12* tragen zur Input- und Output-Bilanzierung nicht bei, wurden jedoch eingeführt, um die intern ablaufenden Prozesse transparent zu machen.

Input (Transition “Kläranlage Osnabrück”)

zu klärender Input $L1 = (x01+x07+x08)/1000$ **[m³]**

zu klärender Input [m³] = (Abwasser, unspezif. [kg] + NH₄⁺ [kg] + P [kg]) / 1000

Energie, elektrisch $X02 = I1 * KX02 * 3.6 * 1000$ **[kJ]**

Energie, elektrisch [kJ] (externer Bezug)

= zu klärender Input [m³] * ElektrEnergieBezug [kWh_{el} / m³ Abwasser] * 3600

Der Strombezug X02 aus dem Stadtwerkenetz ist geringer als in der Standard-Transition, da im Klärwerk Osnabrück das gesamte Klärgas zur Energieerzeugung eingesetzt wird.

Energie, thermisch **X03 entfällt**

Es wird weder Erdöl noch Erdgas als thermische Energieträger eingesetzt. Durch die Klärgasverbrennung in den BHKW wird genügend Wärme zur Verfügung gestellt.

Chlor **X04 entfällt**

Es wird weder Chlor noch Ozon zur Desinfektion eingesetzt.

Kalk (als CaO) $X05 = I1 * KX05$ **[kg]**

Kalk [kg] = zu klärender Input [m³] * KalkVerbrauch [kg / m³ Abwasser]

Fällungsmittel für P-Elimination $X06 = I1 * KX06$ **[kg]**

Fällungsmittel [kg]

= zu klärender Input [m³] * FällgsmVerbrauch [kg / m³ Abwasser]

Aufgrund kontinuierlicher Einleitung ist der Fällungsmittelverbrauch für die Phosphatelimination somit unabhängig vom jeweiligen Phosphatgehalt.

Output (Transition “Kläranlage Osnabrück”)

Klärschlammrockensubstanz **$L7 = x11 * KL7$** **[kg]**

Klärschlammrockensubstanz [kg] = BSB-5 [kg] * KlärschlammTS

Klärschlamm **$Y13 = I7 + I7 * 1.5$** **[kg]**

Klärschlamm [kg] = KlärschlammTS (40%) [kg] + mit dem Schlamm ausgetragenes Wasser (60%) [kg]

Der abgegebene Klärschlamm hat einen Trockensubstanzanteil von 40%, im Gegensatz zur Standard-Transition, wo ein Trockensubstanzanteil von 20% angesetzt wurde.

Abwasser, geklärt **$Y01 = x01 - I7 * 1.5$** **[kg]**

Abwasser, geklärt [kg]
= Abwasser, unspezif. [kg] – mit dem Schlamm ausgetragenes Wasser (60%) [kg]

Ammonium **$Y03 = x07 * KY03$** **[kg]**

OutputAmmonium [kg] = InputAmmonium [kg] * Ammonium-Entzug

Phosphorverbindungen **$Y04 = x08 * KY04$** **[kg]**

OutputPhosphorverbindungen [kg]
= InputPhosphorverbindungen [kg] * P-Entzug

AOX **$Y06 = x09 * KY06$** **[kg]**

OutputAOX [kg] = InputAOX [kg] * AOX-Entzug

CSB **$Y07 = x10 * KY07$** **[kg]**

OutputCSB [kg] = InputCSB [kg] * CSB-Entzug

BSB-5 **$Y08 = x11 * KY08$** **[kg]**

Output BSB-5 [kg] = Input BSB-5 [kg] * BSB5-Entzug

Nitrat **$Y02 = x07 * 0.05 * 0.776486 * 4.4268$** **[kg]**

Nitrat [kg] = InputAmmonium [kg] * 0,05 * 0,776486 * 4,4268

Bei der weitergehenden Reinigung mit Denitrifikation kann mit einem Wirkungsgrad der N-Elimination (Denitrifikation) von 95% gerechnet werden.

Bezogen auf den NH_4^+ -Input (100%) fallen demnach 95% als N_2 -Output in die Umwelt (vgl. Y15) und 5% als NO_3^- -Output im Überschussschlamm (Y02) an.

Die Parameter 0.776486 und 4,4268 ergeben sich wie folgt:
Reinigungsleistung wird über den N-Gehalt beschrieben, deshalb

Molekulargewicht:

NH_4^+	18,042	
N	14,01	$\rightarrow \text{N} / \text{NH}_4^+ = 0,7765$
NO_3^-	62,01	$\rightarrow \text{NO}_3^- / \text{N} = 4,426$



$$\text{N}_2 \qquad \qquad \qquad \mathbf{Y15 = x07*0.95*0.776486*2} \qquad \qquad \qquad \mathbf{[kg]}$$

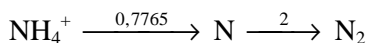
$$\text{N}_2 \text{ [kg]} = \text{InputAmmonium [kg]} * 0,95 * 0,776486 * 4,4268$$

Diese Funktionsdefinition ist in der Standard-Transition nicht enthalten. Sie beschreibt den bei der Denitrifikation entstehenden elementaren Stickstoff, der in die Atmosphäre freigesetzt wird. Bezogen auf den NH_4^+ -Input (100%) fallen demnach 95% als N_2 -Output in die Umwelt (Y15) und 5% als NO_3^- -Output im Überschussschlamm (vgl. Y02) an.

Die Parameter 0.776486 und 2 ergeben sich wie folgt:
Reinigungsleistung wird über den N-Gehalt beschrieben, deshalb

Molekulargewicht:

NH_4^+	18,042	
N	14,01	$\rightarrow \text{N} / \text{NH}_4^+ = 0,7765$
N_2	28,02	$\rightarrow \text{N}_2 / \text{N} = 2$



$$\mathbf{\text{Energieverluste, thermisch} \qquad \qquad \qquad \mathbf{Y17 = 14*0.089*1e9} \qquad \qquad \qquad \mathbf{[kJ]}}$$

$$\text{Energieverluste, thermisch [TJ]} = \text{Klär gas [kJ]} * 0,089 * 10^9$$

Diese Funktionsdefinition ist in der Standard-Transition nicht enthalten. Sie beschreibt die Verluste der BHKW bei der Verbrennung von Klär gas (h = 8,9%), umgerechnet auf kJ.

Emissionen durch Klär gasverbrennung (Transition "Klär anlage Osnabrück")

$$\mathbf{\text{Klär gas} \qquad \qquad \qquad \mathbf{L4 = 11*KL4A*KL4B/1e9} \qquad \qquad \qquad \mathbf{[TJ]}}$$

$$\text{Klär gas [TJ]} = \text{zu klär ender Input [m}^3 \text{ Abwasser]} * \text{Klär gasanfall [m}^3 \text{ Klär gas / m}^3 \text{ Abw.]} * \text{Klär gasheizwert [kJ / m}^3 \text{ Klär gas]} * 10^{-9}$$

Staub **Y09 = 14*2** **[kg]**

Staub [kg] = Klärgas [TJ] * 2 [kg / TJ Klärgas]

Kohlendioxid, reg. **Y10 = 14*91700** **[kg]**

Kohlendioxid, reg. [kg] = Klärgas [TJ] * 91700 [kg / TJ Klärgas]

NO_x **Y11 = 14*74** **[kg]**

NO_x [kg] = Klärgas [TJ] * 74 [kg / TJ Klärgas]

SO₂ **Y12 = 14*184** **[kg]**

SO₂ [kg] = Klärgas [TJ] * 184 [kg / TJ Klärgas]

Energie-Emission, thermisch **Y14 = 14*0.3012*1e9** **[kJ]**

Energie-Emission, thermisch [TJ] = Klärgas [kJ] * 0,3012 * 10⁹

Diese Funktionsdefinition ist in der Standard-Transition nicht enthalten.

Bei der Verbrennung des Klärgases im BHKW wird neben Strom zu 60,7% Wärme erzeugt. 30,12% der erzeugten Energie werden als ungenutzte Wärmeemission (Y14) an die Umgebung abgeführt.

Interner Fluß (Transition “Kläranlage Osnabrück”)

Die internen Flüsse Z01, Z02 und X12 tragen zur Input- und Output-Bilanzierung nicht bei, wurden jedoch eingeführt, um die intern ablaufenden Prozesse transparent zu machen.

Strom aus Klärgas **Z01 = 14*0.304** **[TJ]**

Strom aus Klärgas [TJ] = Klärgas [TJ] * 0,304

Bei der Verbrennung des Klärgases in BHKW wird zu 30,4% Strom erzeugt, der zum größten Teil selbst genutzt wird oder ins Stadtwerkenetz eingespeist wird. Als Output erscheint der abgeführte Strom nicht, statt dessen wird als Input ein “Strombezug Netto” angesetzt, der sich berechnet aus dem “Strombezug extern” abzüglich der Einspeisung.

Wärme aus Klärgas **Z02 = 14*0.3058** **[TJ]**

Wärme aus Klärgas [TJ] = Klärgas [TJ] * 0,3058

Hierbei handelt es sich um einen interner Fluß.

Bei der Verbrennung des Klärgases in BHKW wird zu 60,7% Wärme erzeugt. 30,58% der erzeugten Energie werden in Form von Wärme (Z02) genutzt. So kann auf den Zukauf von Erdöl oder Erdgas verzichtet werden.

Fett **X12 = 11*0.0026** **[m³]**

Fett [m³] = zu klärender Input [m³ Abwasser] * 0,0026 m³ / m³ Abwasser

Zusätzlich werden 100 m³ Speisefett pro Tag angeliefert, dies entspricht 0,0026 m³ / m³ Abwasser. Dieses Fett stammt aus der lebensmittelverarbeitenden Industrie sowie aus Großküchen und wird direkt dem Faulturm zugeführt.

Fettzusammensetzung und Konsistenz ändern sich täglich und werden bei der Anlieferung nicht erfaßt, so daß hier auf Berechnung von Gewicht und Energiegehalt verzichtet werden muß. Es ist jedoch anzumerken, daß durch Fettzufuhr der Energieeintrag in das System etwas höher ist als bilanziert.

8 Simulation der Abwasserklärung

8.1 Zusammensetzung des Abwassers

Da in den Laboratorien der Universität Chemikalien in größeren Mengen umgesetzt werden, wurde zur den Inhaltstoffen des Abwassers der zuständige Umweltbeauftragte der Universität befragt (Thomas Wehling, Sachgebiet 6.8, Umweltschutz und Gefahrstoffe, Tel. 969-2401)

- Generell gilt:
Es ist keine Dokumentation vorhanden, welche Chemikalien in größeren Mengen eingeleitet werden.
Eine Analyse des Abwassers hinsichtlich bestimmter Chemikalien wird nicht durchgeführt.
- Abwasser der Chemie und Physik (Gebäude 32):
Eine Bilanzierung der Chemikalien ist nicht möglich, da Feststoff-Abfall über Gewicht abgerechnet wird und Lösungsmittel verdunsten. Anzumerken ist jedoch, daß durch die Verwendung von Membranpumpen statt Wasserstrahlpumpen eine Reduzierung der Lösungsmittel im Abwasser erreicht werden konnte. Quantifizieren läßt sich diese Aussage jedoch nicht. → Keine Aussage über Chemikalien im Abwasser möglich.
- Abwasser der Biologie (Gebäude 35):
Für die Laborabwässer gilt das für die Chemie und Physik Gesagte. Im Isotopenlabor wird unterschieden zwischen:
 - direkten Spülwässern, die von einer Entsorgungsfirma abgeholt werden
 - abklingbaren Spülwässern mit $T_{1/2} < 100$ Tage (=2. und 3. Spülwässer), die ins Isotopenabklingbecken geführt werden. Eine nachgeschaltete Meßanlage kontrolliert den Abfluß in die Kanalisation.→ Keine Aussage über Chemikalien im Abwasser möglich.
- Abwasser der Gesundheitswissenschaften und Physiklabors im AVZ (Gebäude 31):
Auch hier ist keine Aussage über Chemikalien im Abwasser möglich.
- Abwasser der übrigen Universitätsgebäude:
Kann als Haushaltsabwasser betrachtet werden, da es sich hierbei um reine Verwaltungsgebäude handelt. Der Phosphat-Gehalt ist geringer anzusetzen als im Haushaltsabwasser, da kein Phosphateintrag über Waschmittel o.ä. erfolgt.

Fazit:

Eine Aussage über Schadstoffe im Abwasser ist nicht möglich. Es kann jedoch angenommen werden, daß sich das universitäre Abwasser nicht signifikant vom kommunalen (städtischen) Abwasser unterscheidet.

8.2 Abwassermenge

Die Menge an Abwasser kann bei den meisten Gebäuden mit der Menge an bezogenem Trinkwasser gleichgesetzt werden. In einigen Gebäuden gelangt ein Teil des Trinkwassers jedoch nicht in die Kanalisation, so wird z.B. im Botanischen Garten der größte Teil des Wassers zur Pflanzenbewässerung eingesetzt. Es existieren separate Zähler für dieses Wasser, so daß keine Abwassergebühr bezahlt werden muß. Die Verbräuche der Mensa (Gebäude 131) und der Kneipe Unicum (Gebäude 141) wurden nicht berücksichtigt, da sie nicht zur Universität gehören, sondern eigenständig (vom Studentenwerk bzw. privat) betrieben werden.

Zieht man das nicht eingeleitete Wasser (8.154 m³) vom gesamten Trinkwasser (50.150 m³) ab, erhält man für 1996 das eigentliche Abwasser von 41.996 m³. Damit liegt auch schon die Wasserbilanz der Universität vor (Tab. 8.1).

Tab. 8.1: Wasserbilanz der Universität Osnabrück (1996)

Input 1996	Menge	Dim	Output 1996	Menge	Dim
Wasser, unspezif.	50.150	m ³	Abwasser, unspezif.	41.996	m ³
			Wasser, unspezif.	8.154	m ³

Nachfolgende Tabelle soll die Größenordnung der Universität Osnabrück verdeutlichen:

Tab. 8.2: Zahlen zur Universität Osnabrück (1996)

1996		
Beschäftigte	1.248	
Studierende (Sommer 1996)	12.106	
Gebäude	35	
Hauptnutzfläche	~70.000 m ²	
Stromverbrauch	7.952 MWh	(≅ 116 kWh/m ²)
davon durch BHKW erzeugt	1.387 MWh	(≅ 17%)
Wärmeverbrauch	17.202 MWh	(≅ 268 kWh/m ²)
Energiekosten	~ 2,3 Mio DM	
Wasserverbrauch	51.150 m ³	(≅ 0,73 m ³ /m ²)

8.3 Stoffstromnetz

Im Idealfall modelliert der Bilanzierer die Prozesse seines Betriebes mit eigenen Daten und ergänzt die Ökobilanz durch Bibliotheksmodule von den ihm nicht näher bekannten Prozessen, z.B. die Lkw-Transporte oder die Strombereitstellung aus dem öffentlichen Netz.

Wie oben erläutert, wurde für den eigentlich darzustellenden Prozeß die Standard-Transition “Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette” umgeschrieben und erweitert. Das spezielle System Klärwerk Osnabrück wird nun durch die Transition T1 “Kläranlage Osnabrück” beschrieben.

Bei der Erstellung der Ökobilanz der Universität Osnabrück sollen jedoch -falls möglich- auch die “indirekten” Stoff- und Energieflüsse berücksichtigt werden, die außerhalb der Universität (bzw. des Klärwerks) ablaufen. So wurde die Transition T1 “Kläranlage Osnabrück” um die Vorkette der Strombereitstellung durch die Standard-Transition T2 “Stromnetz_BRD” erweitert (Abb. 8.1). Basierend auf dem Strombezug (X02) wird somit berechnet, wieviel Primärenergie für die Stromproduktion eingesetzt werden muß und wieviel Emissionen dabei anfallen. Es kann z.B. verglichen werden, wieviel CO₂-Emissionen schon in der Vorkette und wieviel im Klärwerk selbst anfallen.

Abb. 8.1 zeigt das verwendete Stoffstromnetz. Das in den einzelnen Gebäuden der Universität anfallende Abwasser wird in einer Stelle zusammengeführt, die den Übergabepunkt zur Kläranlage darstellt. Der gesamte Output der Universität geht als Input (Stelle P1) in die Transition T1 “Kläranlage_Osnabrück” ein. Ein weiterer Input wird zugeführt durch die Reagentien, die im Klärwerk zur Abwasserbehandlung benötigt werden (Stelle P2). Außerdem muß noch Strom (Stelle P3) zugeführt werden. Wie bereits erwähnt, wird als Vorkette die Transition T2 “Stromnetz_BRD” verwendet (hier als T2: Strom-Vorkette).

Innerhalb der Transition T1 werden diejenigen Prozesse simuliert, die zur Abwasserreinigung nötig sind. Als Output erhält man geklärtes Abwasser und Klärschlamm sowie Reste der Zusätze (Stelle P8), aus der Verbrennung Klärgases resultierende Emissionen (Stelle P9, Stelle P10), sowie Energieverluste und nicht genutzte Wärme (Stelle P7). Hinzu kommen noch die Emissionen, die bei der Stromerzeugung anfallen und dort (Stelle P5, Stelle P6) gesammelt werden.

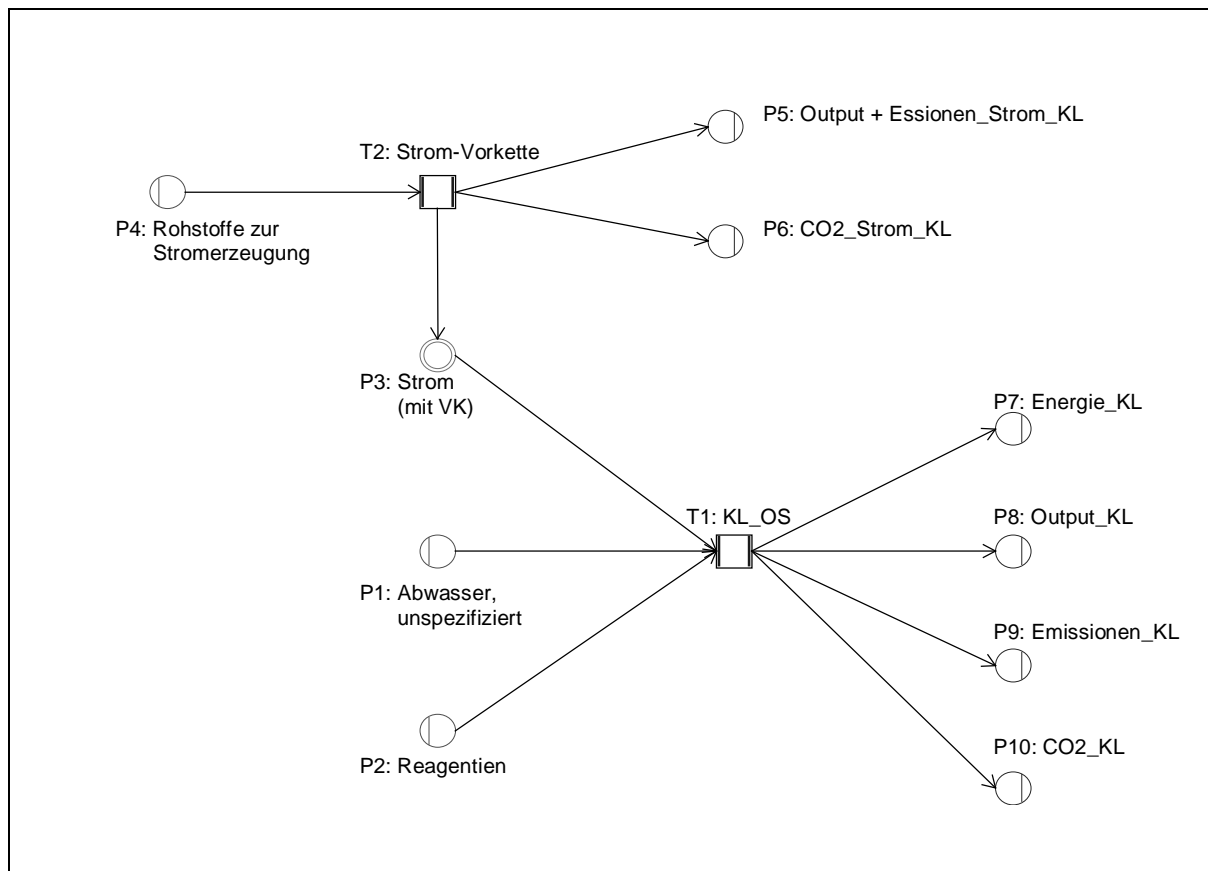
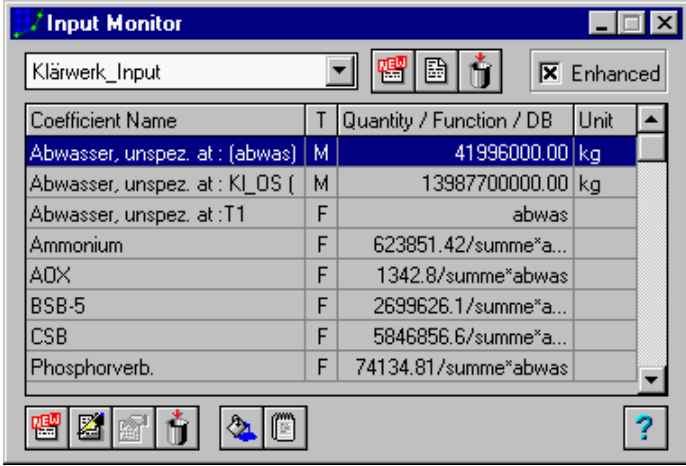


Abb. 8.1: Stoff- und Energiestromnetz der Abwasserklärung

Zur Simulation des Klärprozesses werden Mengenangaben über die Inhaltstoffe des universitären Abwassers benötigt. Da keine Messungen vorliegen (vgl. Kap. 8.1), werden die in der Kläranlage Osnabrück gemessenen Werte verwendet und auf die Menge des zu betrachtenden Abwassers heruntergerechnet. Dazu wurde ein *Input-Vektor Klärwerk_Input* definiert, der die Stoffmengen bezogen auf die Abwasser-Inputmenge berechnet (Abb. 8.2). Auch dies stützt die modulare Abgeschlossenheit der Transition T1 “Kläranlage Osnabrück”.



The screenshot shows a software window titled "Input Monitor" with a dropdown menu set to "Klärwerk_Input". Below the menu is a table with the following data:

Coefficient Name	T	Quantity / Function / DB	Unit
Abwasser, unspez. at : (abwas)	M	41996000.00	kg
Abwasser, unspez. at : KJ_OS (M	13987700000.00	kg
Abwasser, unspez. at : T1	F	abwas	
Ammonium	F	623851.42/summe*a...	
AOX	F	1342.8/summe*abwas	
BSB-5	F	2699626.1/summe*a...	
CSB	F	5846856.6/summe*a...	
Phosphorverb.	F	74134.81/summe*abwas	

Abb. 8.2: Input-Vektor Klärwerk_Input

9 Ergebnisse

Das Resultat der Simulation und durchgeführten Berechnung ist die *Bilanz der Abwasserklärung für das Jahr 1996*. Die nachfolgenden Tabellen enthalten alle Materialien, die zur Klärung des universitären Abwassers nötig sind und die in der Kläranlage aus ihnen entstehen (Tab. 9.1, 9.2 und 9.3). Die Bilanzgrenze umfaßt auf der Input-Seite neben der Universität auch die Vorkette der Stromerzeugung und auf der Output-Seite die Kläranlage Osnabrück.

Tab. 9.1: Bilanz der Abwasserklärung (1996), berechnet mit der Transition "Kläranlage Osnabrück"⁷

Input			Output		
Material	Menge	Dim	Material	Menge	Dim
Abwasser, unspezifiziert	41.996,00	m ³	Abwasser (Kühlwasser)	174.603,13	kg
Ammonium (W)	1.873,02	kg	Abwasser, geklärt	41.984,07	m ³
AOX (W)	4,03	kg	Abwasser, unspezifiziert	0,24	m ³
Braunkohle (RiL)	2.927,08	kg	Ammoniak (L)	0,03	kg
BSB-5 (W)	8.105,23	kg	Ammonium (W)	83,91	kg
CSB (W)	17.554,32	kg	AOX (W)	1,91	kg
Erdgas (RiL)	121,70	m ³	Aschen,Schlacken(AzB)	138,58	kg
Erdöl (RiL)	27,42	kg	Aschen,Schlacken(AzV)	428,55	kg
Fällungsmittel	524,98	kg	BSB-5 (W)	155,62	kg
Kalk	8.714,60	kg	Chlorwasserstoff (L)	0,25	kg
Kalkstein (RiL)	66,97	kg	CSB (W)	1.615,00	kg
Kühlwasser	179.182,21	kg	Distickstoffmonoxid (L)	0,19	kg
Phosphorverbindg. (W)	222,58	kg	Energie-Emission,therm.	63.043.836	kJ
Steinkohle (RiL)	836,31	kg	Energieverluste, therm.	18.628.491	kJ
Wasser, unspezifiziert	869,79	kg	Fluorwasserstoff (L)	0,01	kg
			Gips (REA)	120,20	kg
			Klärschlamm (AzV)	19.878,07	kg
			Kohlendioxid, fossil (L)	5.373,36	kg
			Kohlendioxid, regen. (L)	19.193,62	kg
			Kohlenmonoxid (L)	1,11	kg
			Methan (L)	11,85	kg
			N ₂ (L)	2.763,31	kg
			Nitrat (W)	321,91	kg
			NMVOC, unspez. (L)	0,15	kg
			NOx (L)	19,52	kg
			Phosphorverbindg. (W)	20,92	kg
			Schwefeldioxid (L)	42,02	kg
			Sondermüll (AzB)	0,27	kg
			Staub (L)	5,73	kg

⁷ W = Wasser, L = Luft, AzB = Abfall zur Beseitigung, AzV = Abfall zur Verwertung, RiL = Rohstoff in Lagerstätten

Tab. 9.2: Bilanz der Abwasserklärung (1996), geordnet nach Transitionen
berechnet mit der Transition "Kläranlage Osnabrück"⁸

Input			Output		
Material	Menge	Dim	Material	Menge	Dim
T1 = KL_OS			T1 = KL_OS		
Abwasser, un spezifiziert	41.996,00	m ³	Abwasser, geklärt	41.984,07	m ³
Ammonium (W)	1.873,02	kg	Ammonium (W)	83,91	kg
AOX (W)	4,03	kg	AOX (W)	1,91	kg
BSB-5 (W)	8.105,23	kg	BSB-5 (W)	155,62	kg
CSB (W)	17.554,32	kg	CSB (W)	1.615,00	kg
Fällungsmittel	524,98	kg	Energie-Emission, therm	63.043.836	kJ
Kalk	8.714,60	kg	Energieverluste, therm.	18.628.491	kJ
Phosphorverbindg. (W)	222,58	kg	Klärschlamm (AzV)	19.878,07	kg
			Kohlendioxid, regen.(L)	19.193,62	kg
			N ₂ (L)	2.763,31	kg
			Nitrat (W)	321,91	kg
			NO _x (L)	15,49	kg
			Phosphorverbindg.(W)	20,92	kg
			Schwefeldioxid (L)	38,51	kg
			Staub (L)	0,42	kg
T2 = Strom-Vorkette			T2 = Strom-Vorkette		
Braunkohle (RiL)	2.927,08	kg	Abwasser (Kühlwasser)	174.603,13	kg
Erdgas (RiL)	121,70	m ³	Abwasser, un spezifiziert	0,24	m ³
Erdöl (RiL)	27,42	kg	Ammoniak (L)	0,03	kg
Kalkstein (RiL)	66,97	kg	Aschen,Schlacken(AzB)	138,58	kg
Kühlwasser	179.182,21	kg	Aschen,Schlacken(AzV)	428,55	kg
Steinkohle (RiL)	836,31	kg	Chlorwasserstoff (L)	0,25	kg
Wasser, un spezifiziert	869,79	kg	Distickstoffmonoxid (L)	0,19	kg
			Fluorwasserstoff (L)	0,01	kg
			Gips (REA)	120,20	kg
			Kohlendioxid, fossil (L)	5.373,36	kg
			Kohlenmonoxid (L)	1,11	kg
			Methan (L)	11,85	kg
			NMVOC, un spez. (L)	0,15	kg
			NO _x (L)	4,03	kg
			Schwefeldioxid (L)	3,50	kg
			Sondermüll (AzB)	0,27	kg
			Staub (L)	5,31	kg

⁸ W = Wasser, L = Luft, AzB = Abfall zur Beseitigung, AzV = Abfall zur Verwertung, RiL = Rohstoff in Lagerstätten

Tab. 9.3: Bilanz der Abwasserklärung (1996), geordnet nach Stellen
berechnet mit der Transition "Kläranlage Osnabrück"⁹

Input			Output		
Material	Menge	Dim	Material	Menge	Dim
P1 = Abwasser			P5 = Output Strom_KL		
Abwasser, unspezifiziert	41.996,00	m ³	Abwasser (Kühlwasser)	174.603,13	kg
Ammonium (W)	1.873,02	kg	Abwasser, unspezifiziert	0,24	m ³
AOX (W)	4,03	kg	Ammoniak (L)	0,03	kg
BSB-5 (W)	8.105,23	kg	Aschen,Schlacken AzB)	138,58	kg
CSB (W)	17.554,32	kg	Aschen,Schlacken(AzV)	428,55	kg
Phosphorverbdg.(W)	222,58	kg	Chlorwasserstoff (L)	0,25	kg
P2 = Reagentien			Distickstoffmonoxid (L)	0,19	kg
Fällungsmittel	524,98	kg	Fluorwasserstoff (L)	0,01	kg
Kalk	8.714,60	kg	Gips (REA)	120,20	kg
P4 = Rohstoffe Strom			Kohlenmonoxid (L)	1,11	kg
Braunkohle (RiL)	2.927,08	kg	Methan (L)	11,85	kg
Erdgas (RiL)	121,70	m ³	NMVOC, unspez. (L)	0,15	kg
Erdöl (RiL)	27,42	kg	NOx (L)	4,03	kg
Kalkstein (RiL)	66,97	kg	Schwefeldioxid (L)	3,50	kg
Kühlwasser	179.182,21	kg	Sondermüll (AzB)	0,27	kg
Steinkohle (RiL)	836,31	kg	Staub (L)	5,31	kg
Wasser, unspezifiziert	869,79	kg	P6 = CO₂ Strom_KL		
			Kohlendioxid, fossil (L)	5.373,36	kg
			P7 = Energie_KL		
			Energie-Emission, therm	63.043.836	kJ
			Energieverluste, therm.	18.628.491	kJ
			P8 = Output_KL		
			Abwasser, geklärt	41.984,07	m ³
			Ammonium (W)	83,91	kg
			AOX (W)	1,91	kg
			BSB-5 (W)	155,62	kg
			CSB (W)	1.615,00	kg
			Klärschlamm (AzV)	19.878,07	kg
			Nitrat (W)	321,91	kg
			Phosphorverbindg. (W)	20,92	kg
			P9 = Emissionen_KL		
			N ₂ (L)	2.763,31	kg
			NOx (L)	15,49	kg
			Schwefeldioxid (L)	38,51	kg
			Staub (L)	0,42	kg
			P10 = CO₂ KL		
			Kohlendioxid, regen. (L)	19.193,62	kg

Nach Transitionen geordnet (Tab. 9.2), hat die Bilanz den Vorteil, daß die einzelnen Materialien gut ihrem Ursprung zugeordnet werden können. Es gibt in diesem Fall jedoch nur 3 Stoffe, die in beiden Transitionen gleichzeitig vorkommen:

⁹ W = Wasser, L = Luft, AzB = Abfall zur Beseitigung, AzV = Abfall zur Verwertung, RiL = Rohstoff in Lagerstätten

- SO₂ (L) mit 38,51 kg in T1 und 3,50 kg in T2
- NO_x (L) mit 15,49 kg in T1 und 4,03 kg in T2
- Staub (L) mit 0,42 kg in T1 und 5,31 kg in T2

Die regionale Belastung durch die Kläranlage Osnabrück (T1) ist für diese Materialien also erheblich höher als diejenige am Standort der Stromerzeugung (T2).

In folgenden wird die Bilanz einiger ausgewählter Materialien genauer betrachtet:

Kohlendioxid:

CO₂ ist ein weiterer Stoff, der sowohl im Klärwerk als auch bei der Stromerzeugung anfällt. Als Emission des Klärwerks wird CO₂ als *Kohlendioxid, regenerativ* benannt, da es aus den Stoffwechselprodukten des Menschen stammt und ursprünglich der Atmosphäre entzogen wurde. Auf dem Weg über das Abwasser, den Klärschlamm und das Faulgas findet es sich dann in den Abgasen der BHKW wieder. Im Gegensatz dazu stammt das bei der Stromerzeugung emittierte CO₂ aus fossilen Brennstoffen und wird somit als *Kohlendioxid, fossil* bezeichnet. CO₂ entsteht in folgenden Mengen:

- CO₂, regenerativ mit 19.194 kg in T1
- CO₂, fossil mit 5.373 kg in T2

Energie:

Energie wird auf der Output-Seite der Kläranlage aufgeführt als:

- Energie-Emission, thermisch mit 17.512 kWh = 63.044 MJ in T1
- Energieverluste, thermisch mit 5.175 kWh = 18.629 MJ in T1

Während *Energieverluste, thermisch* Umwandlungsverluste innerhalb der BHKW beschreibt, steht *Energie-Emission, thermisch* für wertvolle, nutzbare Wärme, die mangels Abnehmern in die Atmosphäre abgegeben werden muß. Zum Vergleich: Diese Menge beträgt ca. ein Tausendstel des Wärmeverbrauchs der Universität im gleichen Jahr (17.202 MWh, Tab. 8.2).

N₂:

Hier wird der bei der Denitrifikation entstehende *elementare Stickstoff* (N₂) beschrieben, der in die Atmosphäre freigesetzt wird. Bezogen auf den NH₄⁺-Input (100%) werden 95% als N₂-Output in die Umwelt emittiert.

- N₂ mit 2.763,31 kg in T1

Durch die 3. Stufe der Abwasserklärung wird somit eine große Menge biologisch nicht nutzbarer Stickstoff (N₂) freigesetzt. Dies gehört mit zu den Zielsetzungen einer Kläranlage, da biologisch verfügbarer Stickstoff in unserer Region im Überschuß vorhanden ist.

10 Vergleich

Von Interesse ist es, die Ergebnisse der Simulation der Abwasserklärung, durchgeführt mit der Transition "Kläranlage Osnabrück" (vgl. Kap. 7.2 und Kap. 9), zu vergleichen mit den Ergebnissen einer Simulation, bei der die Umberto[®]-Standardtransition "Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette" (vgl. Kap. 6.3) eingesetzt wurde.

Hierzu wurde in das Stoffstromnetz die Transition T1 "Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette" eingebaut. Diese Transition benötigt, im Gegensatz zur Transition "Kläranlage Osnabrück", die Zufuhr von thermischer Energie in Form von Heizöl.

Abb. 10.1 zeigt das modifizierte Stoffstromnetz. Um die Vorkette der Wärmeerzeugung komplett zu erfassen, werden zwei weitere Umberto[®]-Standardtransitionen verwendet: Die Transition T3 "Heizölproduktion" (aus: Energievorketten – Erdölprodukte – Heizöl EL, HH) beschreibt die Herstellung von leichtem Heizöl, welches dann in der Transition T4 "Heizwerk" (aus: Energieerzeugung – Heizwerk o.V. – Heizwerk Heizöl EL, 1 MW) zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird. Die Emissionen dieser Wärmevorkette werden in der Stelle P13, der CO₂-Output in der Stelle P14 gesammelt.

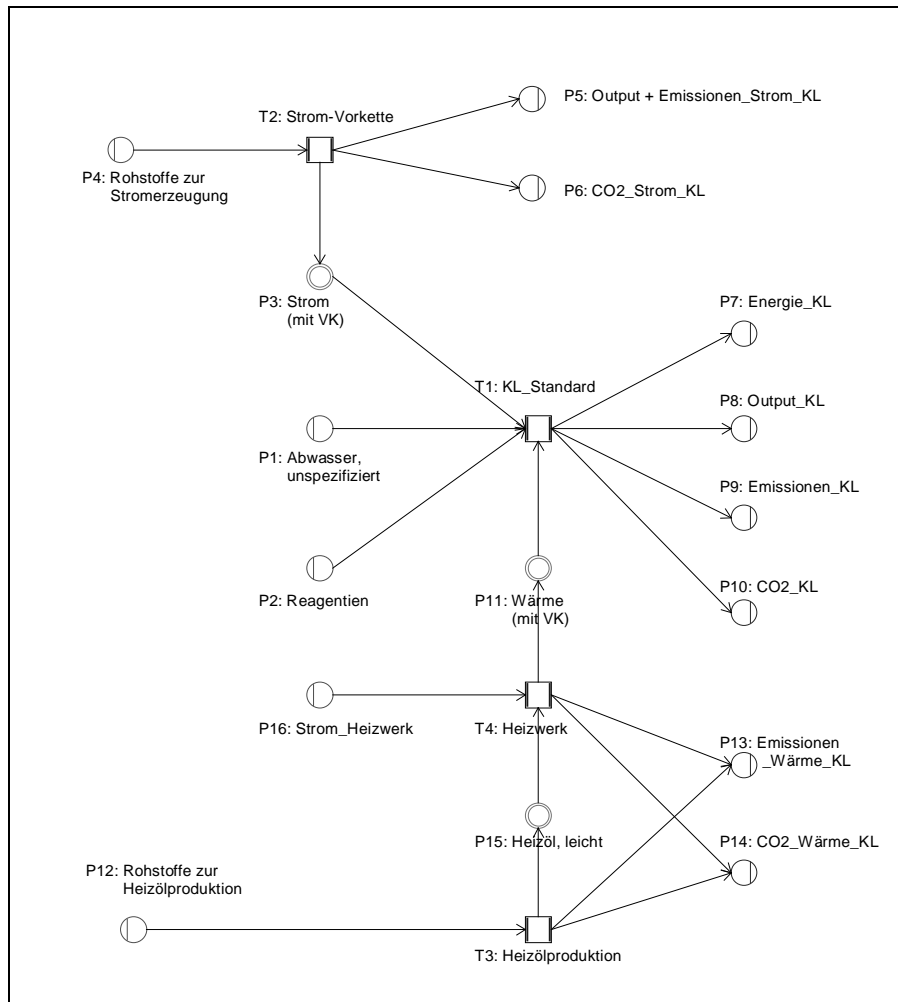


Abb. 10.1: Stoff- und Energiestromnetz der Abwasserklärung mit Verwendung der Umberto[®]-Standardtransition "Weitergehende Kläranlage ohne Vorkette"

Die Resultate dieser modifizierten Simulation finden sich in Tabelle 10.1 bis 10.3, ein Vergleich der Ergebnisse folgt im Anschluß daran.

Tab. 10.1: Bilanz der Abwasserklärung (1996)
berechnet mit der Umberto[®]-Standardtransition "Weitergehende Kläranlage o.V." ¹⁰

Input			Output		
Material	Menge	Dim	Material	Menge	Dim
Abwasser, unspezifiziert	41.996,00	m ³	Abwasser (Kühlwasser)	269.387,69	kg
Ammonium (W)	1.873,02	kg	Abwasser, geklärt	41.964,10	m ³
AOX (W)	4,03	kg	Abwasser, unspezifiziert	0,37	m ³
Braunkohle (RiL)	4.516,07	kg	Ammoniak (L)	0,05	kg
BSB-5 (W)	8.105,23	kg	Ammonium (W)	543,18	kg
Chlor	629,97	kg	AOX (W)	1,61	kg
CSB (W)	17.554,32	kg	Aschen,Schlacken(AzB)	213,81	kg
Energie, elektrisch	39,27	kWh	Aschen,Schlacken(AzV)	661,19	kg
Erdgas (RiL)	187,76	m ³	BSB-5 (W)	129,68	kg
Erdöl (RiL)	226,91	kg	Chlorwasserstoff (L)	0,39	kg
Fällungsmittel	3.049,02	kg	CSB (W)	1.158,59	kg
Kalk	2.384,00	kg	Distickstoffmonoxid (L)	0,29	kg
Kalkstein (RiL)	103,32	kg	Fluorwasserstoff (L)	0,01	kg
Kühlwasser	276.452,55	kg	Gips (REA)	185,45	kg
Phosphorverbindg. (W)	222,58	kg	Klärschlamm (AzV)	39.877,72	kg
Steinkohle (RiL)	1.290,31	kg	Kohlendioxid, fossil (L)	8.837,40	kg
Wasser, unspezifiziert	1.341,97	kg	Kohlendioxid, regen. (L)	11.570,99	kg
			Kohlenmonoxid (L)	1,93	kg
			Methan (L)	18,45	kg
			Nitrat (W)	321,91	kg
			NMVOC, unspez. (L)	0,39	kg
			NOx (L)	15,95	kg
			Phosphorverbindg. (W)	2,23	kg
			Schwefeldioxid (L)	29,45	kg
			Sondermüll (AzB)	0,41	kg
			Staub (L)	8,48	kg

10 W = Wasser, L = Luft, AzB = Abfall zur Beseitigung, AzV = Abfall zur Verwertung, RiL = Rohstoff in Lagerstätten

Tab. 10.2: Bilanz der Abwasserklärung (1996), geordnet nach Transitionen
berechnet mit der Umberto®-Standardtransition "Weitergehende Kläranlage o.V." ¹¹

Input			Output		
Material	Menge	Dim	Material	Menge	Dim
T1 = KL_Standard			T1 = KL_Standard		
Abwasser, unspezifiziert	41.996,00	m ³	Abwasser, geklärt	41.964,10	m ³
Ammonium (W)	1.873,02	kg	Ammonium (W)	543,18	kg
AOX (W)	4,03	kg	AOX (W)	1,61	kg
BSB-5 (W)	8.105,23	kg	BSB-5 (W)	129,68	kg
Chlor	629,97	kg	CSB (W)	1.158,59	kg
CSB (W)	17.554,32	kg	Klärschlamm (AzV)	39.877,72	kg
Fällungsmittel	3.049,02	kg	Kohlendioxid, regen. (L)	11.570,99	kg
Kalk	2.384,00	kg	Nitrat (W)	321,91	kg
Phosphorverbindg. (W)	222,58	kg	NOx (L)	9,34	kg
			Phosphorverbindg. (W)	2,23	kg
			Schwefeldioxid (L)	23,22	kg
			Staub (L)	0,25	kg
T2 = Strom-Vorkette			T2 = Strom-Vorkette		
Braunkohle (RiL)	4.516,07	kg	Abwasser (Kühlwasser)	269.387,69	kg
Erdgas (RiL)	187,76	m ³	Abwasser, unspezifiziert	0,37	m ³
Erdöl (RiL)	42,31	kg	Ammoniak (L)	0,05	kg
Kalkstein (RiL)	103,32	kg	Aschen,Schlacken(AzB)	213,81	kg
Kühlwasser	276.452,55	kg	Aschen,Schlacken(AzV)	661,19	kg
Steinkohle (RiL)	1.290,31	kg	Chlorwasserstoff (L)	0,39	kg
Wasser, unspez.	1.341,97	kg	Distickstoffmonoxid (L)	0,29	kg
			Fluorwasserstoff (L)	0,01	kg
			Gips (REA)	185,45	kg
			Kohlendioxid, fossil (L)	8.290,33	kg
			Kohlenmonoxid (L)	1,72	kg
			Methan (L)	18,29	kg
			NMVOC, unspez. (L)	0,23	kg
			NOx (L)	6,21	kg
			Schwefeldioxid (L)	5,40	kg
			Sondermüll (AzB)	0,41	kg
			Staub (L)	8,19	kg
T3= Heizölproduktion			T3 = Heizölproduktion		
Erdöl (RiL)	184,61	kg	Distickstoffmonoxid (L)	0,00	kg
			Kohlendioxid, fossil (L)	54,42	kg
			Kohlenmonoxid (L)	0,07	kg
			Methan (L)	0,12	kg
			NMVOC, unspez. (L)	0,13	kg
			NOx (L)	0,20	kg
			Schwefeldioxid (L)	0,34	kg
			Staub (L)	0,03	kg
T4= Heizwerk			T4 = Heizwerk		
Energie, elektrisch	39,27	kWh	Distickstoffmonoxid (L)	0,01	kg
			Kohlendioxid, fossil (L)	492,65	kg
			Kohlenmonoxid (L)	0,14	kg
			Methan (L)	0,05	kg
			NMVOC, unspez. (L)	0,03	kg
			NOx (L)	0,20	kg
			Schwefeldioxid (L)	0,50	kg
			Staub (L)	0,01	kg

11 W = Wasser, L = Luft, AzB = Abfall zur Beseitigung, AzV = Abfall zur Verwertung, RiL = Rohstoff in Lagerstätten

Tab. 10.3: Standard-Transition: Bilanz der Abwasserklärung (1996), geordnet nach Stellen
berechnet mit der Umberto®-Standardtransition "Weitergehende Kläranlage o.V." ¹²

Input			Output		
Material	Menge	Dim	Material	Menge	Dim
P1 = Abwasser			P5 = Output Strom_KL		
Abwasser, un spezifiziert	41.996,00	m ³	Abwasser (Kühlwasser)	269.387,69	kg
Ammonium (W)	1.873,02	kg	Abwasser, un spezifiziert	0,37	m ³
AOX (W)	4,03	kg	Ammoniak (L)	0,05	kg
BSB-5 (W)	8.105,23	kg	Aschen,Schlacken(AzB)	213,81	kg
CSB (W)	17.554,32	kg	Aschen,Schlacken(AzV)	661,19	kg
Phosphorverbindg. (W)	222,58	kg	Chlorwasserstoff (L)	0,39	kg
P2 = Reagentien			Distickstoffmonoxid (L)	0,29	kg
Chlor	629,97	kg	Fluorwasserstoff (L)	0,01	kg
Fällungsmittel	3.049,02	kg	Gips (REA)	185,45	kg
Kalk	2.384,00	kg	Kohlenmonoxid (L)	1,72	kg
P4 = Rohstoffe Strom			Methan (L)	18,29	kg
Braunkohle (RiL)	4.516,07	kg	NMVOC, un spez. (L)	0,23	kg
Erdgas (RiL)	187,76	m ³	NOx (L)	6,21	kg
Erdöl (RiL)	42,31	kg	Schwefeldioxid (L)	5,40	kg
Kalkstein (RiL)	103,32	kg	Sondermüll (AzB)	0,41	kg
Kühlwasser	276.452,55	kg	Staub (L)	8,19	kg
Steinkohle (RiL)	1.290,31	kg			
Wasser, un spezifiziert	1.341,97	kg			
P12 = Rohstoffe Heizöl			P6 = CO₂ Strom_KL		
Erdöl (RiL)	184,61	kg	Kohlendioxid, fossil (L)	8.290,33	kg
P16 = Strom Heizwerk			P8 = Output_KL		
Energie, elektrisch	39,27	kWh	Abwasser, geklärt	41.964,10	m ³
			Ammonium (W)	543,18	kg
			AOX (W)	1,61	kg
			BSB-5 (W)	129,68	kg
			CSB (W)	1.158,59	kg
			Klärschlamm (AzV)	39.877,72	kg
			Nitrat (W)	321,91	kg
			Phosphorverbindg. (W)	2,23	kg
			P9 = Emissionen_KL		
			NOx (L)	9,34	kg
			Schwefeldioxid (L)	23,22	kg
			Staub (L)	0,25	kg
			P10 = CO₂ KL		
			Kohlendioxid, regen. (L)	11.570,99	kg
			P13 = Emissionen_Wärme_KL		
			Distickstoffmonoxid (L)	0,01	kg
			Kohlenmonoxid (L)	0,21	kg
			Methan (L)	0,16	kg
			NMVOC, un spez. (L)	0,16	kg
			NOx (L)	0,40	kg
			Schwefeldioxid (L)	0,83	kg
			Staub (L)	0,03	kg
			P14 = CO₂ Wärme		
			Kohlendioxid, fossil (L)	547,07	kg

12 W = Wasser, L = Luft, AzB = Abfall zur Beseitigung, AzV = Abfall zur Verwertung, RiL = Rohstoff in Lagerstätten

In nachfolgender Tabelle 10.4 sind die Simulationsergebnisse einander gegenübergestellt. Hierbei werden nur die Materialien betrachtet, bei denen sich auffällige Differenzen ergaben.

Tab. 10.4: Vergleich der Simulationsergebnisse

Simulation mit KL_OS			Simulation mit KL_Standard		
Material	Menge	Dim	Material	Menge	Dim
Input T1 = Reagentien			Input T1 = Reagentien		
Fällungsmittel	524,98	kg	Fällungsmittel	3.049,02	kg
Kalk	8.714,60	kg	Kalk	2.384,00	kg
Chlor	entfällt		Chlor	629,97	kg
Output T1 = Reinigungseffizienz			Output T1 = Reinigungseffizienz		
Ammonium	83,91	kg	Ammonium	543,18	kg
AOX	1,91	kg	AOX	1,61	kg
BSB-5	155,62	kg	BSB-5	129,68	kg
CSB	1.615,00	kg	CSB	1.158,59	kg
Nitrat	321,91	kg	Nitrat	321,91	kg
Phosphorverbindg.	20,92	kg	Phosphorverbindg.	2,23	kg
Output T1 = Klärschlamm			Output T1 = Klärschlamm		
Klärschlamm 40% TS	19.878,07	kg	Klärschlamm 20% TS	39.877,72	kg
Output T1 = Emissionen			Output T1 = Emissionen		
Kohlendioxid, regen.	19.193,62	kg	Kohlendioxid, regen.	11.570,99	kg
NOx	15,49	kg	NOx	9,34	kg
Schwefeldioxid	38,51	kg	Schwefeldioxid	23,22	kg
Input T2 = Strom-Vorkette			Input T2 = Strom-Vorkette		
Braunkohle	2.927,08	kg	Braunkohle	4.516,07	kg
Erdgas	121,70	m ³	Erdgas	187,76	m ³
Erdöl	27,42	kg	Erdöl	42,31	kg
Steinkohle	836,31	kg	Steinkohle	1.290,31	kg
Output T2 = Strom-Vorkette			Output T2 = Strom-Vorkette		
Kohlendioxid, fossil	5.373,36	kg	Kohlendioxid, fossil	8.290,33	kg
Input T3 + T4= Wärme-Vorkette			Input T3 + T4= Wärme-Vorkette		
Erdöl	entfällt		Erdöl	184,61	kg
Output T3 + T4= Wärme-Vorkette			Output T3 + T4= Wärme-Vorkette		
Kohlendioxid, fossil	entfällt		Kohlendioxid, fossil	547,07	kg

Abschließend ist folgendes anzumerken:

Die Reinigungseffizienz der Transition “Kläranlage Osnabrück” ist bezüglich Ammonium deutlich besser als der in der Transition “Weitergehende Kläranlage o.V.” angesetzte Durchschnitt.

Bei der Reinigungseffizienz bezüglich Phosphorverbindungen ist es genau umgekehrt. In der Transition “Kläranlage Osnabrück” wird zur Phosphatelimination erkennbar weniger Fällungsmittel verwendet.

Bei den übrigen Inhaltsstoffen ist die Reinigungseffizienz vergleichbar.

Die anfallende Menge an Klärschlamm ist bei beiden Transitionen ähnlich groß.

Die Emissionen der Transition “Kläranlage Osnabrück” liegen höher als der angesetzte Durchschnitt, da mehr Klärgas zur Energiegewinnung eingesetzt wird. Der erhöhte CO₂-Ausstoß trägt jedoch nicht zum Treibhauseffekt bei, da es sich hierbei um regeneratives CO₂ handelt, das aus Stoffwechselprodukten stammt.

Der deutlich höhere Anteil der Energiegewinnung aus Klärgas in der Transition “Kläranlage Osnabrück” hat zur Folge, daß weniger fossile Energieträger zugeführt werden müssen (vgl. Input Strom-Vorkette und Wärme-Vorkette). So beträgt der Ausstoß an CO₂ fossilen Ursprungs nur ca. 61% der Emission der Standardtransition.

11 Dank

Herzlich bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Klärwerks Osnabrück, die sehr freundlich und entgegenkommend die für die Modellierung benötigten Daten und Informationen zur Verfügung gestellt haben.

12 Literatur

12.1 Stoffstromanalyse und Umberto[®]

BAUMGARTEN, B. (1990): Petri-Netze, BI Wissenschaftsverlag Mannheim

BRAUNSCHWEIG; A, MÜLLER-WENK, R. (1993): Ökobilanzen für Unternehmungen, Bern

ENQUÊTE-KOMMISSION “SCHUTZ DES MENSCHEN UND DER UMWELT” DES DEUTSCHEN BUNDESTAGES (Hrsg.) (1994): Die Industriegesellschaft gestalten, Economia Verlag Bonn

FACHHOCHSCHULE FURTWANGEN (1998): Umwelterklärung 1997

IFEU; IFU (1996): Umberto-Handbuch, Version 2.0, Heidelberg

IFEU (1994): Endbericht Ökobilanz für Verpackungen, Teilbericht: Energie – Transport – Entsorgung, Heidelberg

HULPKE, H.; MARSMANN, M. (1994): Ökobilanzen und Ökovergleiche, Nachr. Chem. Techn. Lab., 42(1):11-27

- LÜTZKENDORF, T. et al. (1992): Methodische Grundlagen für Energie- und Stoffflußanalysen. Handbuch. EPF Lausanne
- MEYER, U. et al. (1997): Fortgeschrittene EDV-Unterstützung des ökologischen Stoffstrom-Managements. In: Fraunhofer-Institut Chemische Technologie (Hrsg.): Produzieren in der Kreislaufwirtschaft, S. 30.1-30.14
- MÖLLER, A. (1994): Stoffstromnetze. In: Hilty, L.M. et al. (Hrsg.): Informatik für den Umweltschutz. Bd. II., Metropolis Verlag Marburg, S. 223-230
- MÖLLER, A.; HÄUSLEIN, A.; ROLF, A. (1997): Öko-Controlling in Handelsunternehmen, Springer-Verlag Berlin
- PROJEKTGEMEINSCHAFT "LEBENSWEGBILANZEN" (1992): Methode für Lebenswegbilanzen von Verpackungssystemen, Heidelberg
- SCHMIDT, M.; HÄUSLEIN, A. (1997): Ökobilanzierung mit Computerunterstützung, Produktbilanzen und betriebliche Bilanzen mit dem Programm Umberto, Springer Verlag Berlin
- SCHMIDT, M.; SCHORB, A. (1995): Stoffstromanalysen für Ökobilanzen und ÖkoAudits, Springer Verlag Berlin
- SCHMIDT, M. (1995): Stoffstromanalysen als Basis für ein Umweltmanagementsystem im produzierenden Gewerbe. In: HAASIS, H.-D. et al. (Hrsg.): Umweltinformationssysteme in der Produktion, Metropolis Marburg, S. 67-80
- VIEBAHN, P.; MATTHIES, M. (1998): Aufbau eines Umweltmanagementsystems für die Universität Osnabrück - Kurzbericht

12.2 Abwasser und Kläranlagen

- ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V. (Hrsg.) (1982ff): Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band I – VII, 3. Aufl., St. Augustin
- BEVER; STEIN; TEICHMANN (1995): Weitergehende Abwasserreinigung, Oldenbourg Verlag Wien
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT GMBH GTZ (Hrsg.) (1988): Abwassertechnologie, Springer Verlag Berlin
- HÜTTER, L. A. (1994): Wasser und Wasseruntersuchung, 6. Aufl., Salle + Sauerländer Verlag Frankfurt
- KLEE, O. (1991): Angewandte Hydrobiologie, Thieme Verlag Stuttgart
- KOPPE, P.; STOZEK, A. (1990): Kommunales Abwasser (Inhaltsstoffe), Vulkan-Verlag Essen
- MUDRACK, K.; KUNST, S. (1991): Biologie der Abwasserreinigung, Fischer Verlag Stuttgart
- OMHOFF, K. (1990): Taschenbuch der Stadtentwässerung, Oldenbourg Verlag München
- SCHWOERBEL, J. (1993): Einführung in die Limnologie, 7. Aufl., Gustav Fischer Verlag Stuttgart
- STADT OSNABRÜCK (1997): Jahresbericht 1996 Kläranlage Osnabrück