



Markus Eschböck, BSc.

# **Entwicklung eines dynamischen Misch- und Restgasnetzmodells in KBC PetroSIM**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Verfahrenstechnik

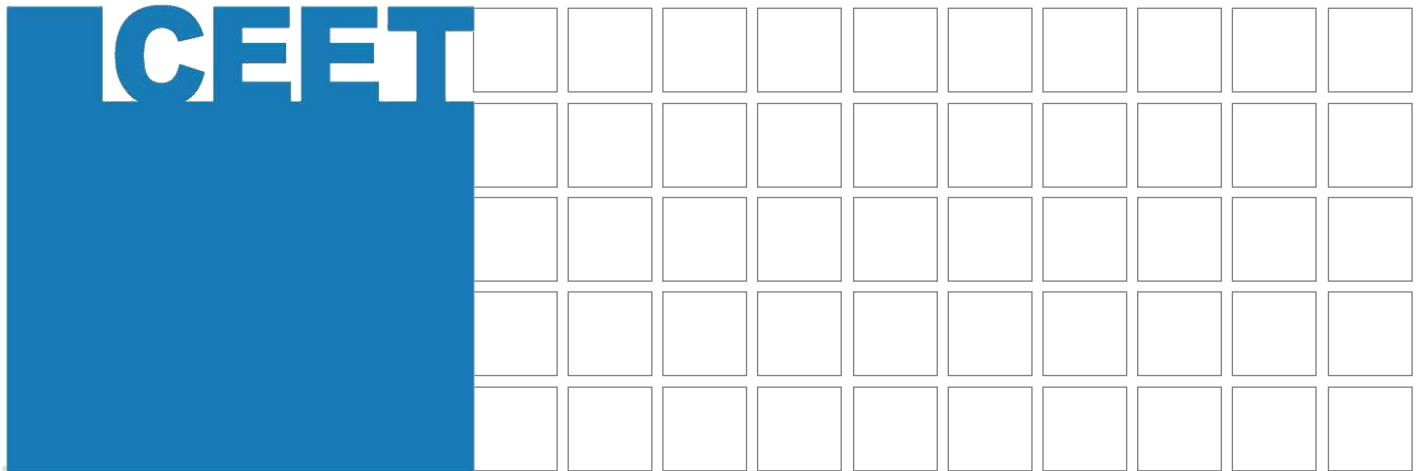
eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Wallek

Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik



# Entwicklung eines dynamischen Misch- und Restgasnetzmodells in KBC PetroSIM

Markus Eschlböck, BSc.

Graz, September 2018



## Danksagung

Alles kommt einmal zu einem Ende und so soll diese Arbeit der krönende Abschluss eines großartigen, nahezu zauberhaften Abschnittes in meinem Leben sein. Viel zu oft sind wir der Auffassung, dass die Umstände in unserer Umgebung selbstverständlich sind. Tatsächlich ist nichts in dieser Welt selbstverständlich und es wäre mir niemals möglich gewesen aus eigener Kraft und ohne äußere Einflüsse das Studium in der Art zu führen. Deswegen möchte ich für einen kurzen Moment innehalten und mich im Folgenden bei einigen Personen bedanken.

Zu aller Erst möchte ich mich bei meinen Eltern Margit und Bernhard bedanken, welche mich über die Jahre nicht nur finanziell unterstützt haben, sondern vor allem mental hinter mir gestanden sind. Ich habe es immer sehr zu schätzen gewusst, dass ich jederzeit mit offenen Armen aufgenommen wurde, wenn ich Rückzug und Erholung suchte. Dafür bin ich euch von Herzen dankbar.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Thomas Wallek für die Möglichkeit und dem Vertrauensvorschuss bedanken, in seiner Arbeitsgruppe mitwirken zu können. Die Arbeit war sehr lehrreich und gezeichnet durch ein gutes Arbeitsklima. Ein besonderer Dank sei an Florian und Fabian gerichtet, welche mich in der Vergangenheit betreut hatten und bei denen ich mir stets Rat einholen und sehr unterhaltsame Dialoge führen konnte.

Ich möchte mich bei meinen Studienkollegen und -kolleginnen für die schöne Zeit und die gegenseitige Unterstützung und den regen Wissensaustausch bedanken, welche uns in einigen Situationen Vorteile schafften und uns so große Hürden niedriger erscheinen ließen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Wohnungskollegen Martin und Hannes bedanken für das bisherige Zusammenleben. Das gemeinsame Leben mit diesen bemerkenswerten Personen hat mich in den letzten 5 Jahren maßgebend geprägt und dafür mache ich sie an dieser Stelle verantwortlich.

Ich blicke voller Spannung, Freude und etwas Ehrfurcht in eine glorreiche Zukunft.

Vielen Dank für eure Unterstützung!

Masterarbeit  
für  
Herrn Markus Eschlböck, BSc.

## Aufgabenstellung

In einer Raffinerie fallen in sämtlichen Anlagenbereichen Gasfraktionen (Restgase) an, die gesammelt und mit Erdgas gemischt (Mischgas) werden. Dieses Mischgas wird als Heizgas den Anlagen zugeführt und so verwertet. Fraktionen dieser Gase werden in sogenannten Restgasoptimierungsanlagen zuvor abgetrennt und als hochwertiger Einsatzstrom für die Herstellung von Kunststoffen bereitgestellt.

Ziel der Masterarbeit ist die dynamische Simulation dieses Gassystems in KBC PetroSIM, wobei eine Schnittstelle zu Wolfram Mathematica aufgebaut werden soll, welches die Simulation steuert und die Ergebnisse für weitere Berechnungen zugänglich macht. Die Simulation ermöglicht es, Ausfallszenarien nachzurechnen bzw. die Gaszusammensetzungen am Ausgang der Restgasoptimierungsanlagen in Abhängigkeit vom Einsatz abbilden zu können.

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum

---

Unterschrift

## Kurzfassung

Um eine Vorhersage von Durchfluss, Temperatur, Zusammensetzung und Druck diverser Ströme im Rest- und Mischgasnetzwerk einer Raffinerie zu ermöglichen und somit ferner geplante oder auch unerwartete Szenarien und ihre Auswirkungen auf das Netzwerk abschätzen zu können, wurde in KBC PetroSIM ein Rest- und Mischgassystem implementiert. Das resultierende, dynamische Modell kann zur Optimierung des ganzen Systems oder aber auch für vereinzelte Anlagenbereiche verwendet werden. So wurde in dieser Arbeit ein grundlegendes Verfahrensbild entwickelt und statisch simuliert, einen Methanolreaktor zur Methanolsynthese aus Kohlendioxid und Wasserstoff in den bestehenden Prozess zu integrieren und so die Möglichkeit zu schaffen, für die Raffinerie Methanol herstellen zu können. Mithilfe von einigen Case Studies wird ein grundlegendes Verhalten des vorliegenden Systems in dieser Arbeit charakterisiert.

## Abstract

To facilitate the prediction of flow, temperature, composition and pressure of any streams in a purge and fuel gas network of a refinery and moreover to estimate the impact of planned and unplanned scenarios on the network, a model of a purge and fuel gas network was implemented into KBC PetroSIM. The resulting, dynamical model can also be used for optimisation of the whole network or for subareas of the system. So, a fundamental process flowsheet was developed and simulated statically to integrate a methanol reactor for methanol synthesis out of carbon dioxide and hydrogen into the existing process and enable the possibility to produce the demand of methanol for the refinery. With the assistance of some case studies a fundamental behaviour of the existing system is characterized in this thesis.

## Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung .....	2
2	Verfahrensbeschreibung des Misch- und Restgassystems .....	3
2.1	Grundlagen .....	3
2.1.1	Entschwefelung des Restgases .....	3
2.1.2	Arsenreaktoren .....	4
2.1.3	Fackelgas .....	4
2.2	Anlage 1 .....	6
2.3	Anlage 2 .....	6
2.4	Anlage 3 .....	7
3	Bilanzierung .....	8
4	Modellierung und Validierung .....	11
5	Ergebnisse .....	19
5.1	Bilanz .....	19
5.2	Modellierung und Validierung .....	30
5.3	Case Studies .....	33
5.3.1	Absorption von Propan in Kolonne 1 .....	33
5.3.2	Optimierte Ströme 16, 17, 21 und 22 – Szenario 2 .....	36
5.3.3	Ausfall Anlage 7 .....	38
5.3.4	Ausfall Ströme 16, 17, 21 und 22 .....	39
5.3.5	Methanolreaktor .....	40
5.3.6	Ausnahmebetrieb .....	42
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	44
7	Anhang .....	47
7.1	Bilanz .....	47
7.2	Modellierung .....	71
7.3	Case Studies .....	88
7.4	Abbildungsverzeichnis .....	114
7.5	Tabellenverzeichnis .....	116

## 1 Einleitung und Zielsetzung

In einer Raffinerie fallen in vielen Bereichen sogenannte Restgase an. Dabei handelt es sich um Gase, welche hauptsächlich aus kurzkettigen Kohlenwasserstoffen bestehen. Diese Restgase werden gesammelt und Verunreinigungen wie beispielsweise Schwefelverbindungen ausgewaschen. Die gewaschenen Restgase bestehen aus leichten Gasfraktionen (Wasserstoff, Methan, Ethan, Stickstoff, ...) und schweren Gasfraktionen (Propylen, Butadien, ...) und werden in den Restgasanlagen aufgetrennt. Die Bestandteile der schweren Gasfraktionen stellen wertvolle Ausgangsstoffe für die Kunststoffindustrie dar. Die leichten Gasfraktionen werden mit Erdgas gemischt und zur Befeuerung der Anlagen wieder rückgeführt und verwertet.

Durch eine dynamische Simulation des Rest- und Mischgassystems können Vorhersagen bzgl. Zusammensetzung, Druck, Temperatur und Durchflussmenge aller Ströme im Netzwerk getroffen werden. Mit verschiedenen Ausfallszenarien ist es auch möglich, das Verhalten des Systems zu analysieren.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell soll dazu verwendet werden, um abzuschätzen, wie sich ein unerwarteter Ausfall oder aber auch bewusste Abschaltungen einer oder mehrerer Anlagen (wenn beispielsweise eine Sanierung einer Anlage notwendig ist) sich auf das Rest- und Mischgassystem auswirken. Weiters wird als Neuheit in das bestehende Rest- und Mischgassystem ein Prozess zur Methanolsynthese integriert, um das so produzierte Methanol in der Raffinerie einzusetzen und den unter Umständen so produzierten Überschuss zu verkaufen.



## 2 Verfahrensbeschreibung des Misch- und Restgassystems

Das Misch- und Restgassystem besitzt im Wesentlichen die Aufgabe, für die Kunststoffindustrie wertvolle Gase wie Ethen, Propen, Butadien abzutrennen, mithilfe von Erdgas ein Mischgas bereitzustellen, welches zum Beheizen von Anlagen benötigt wird und aus den anfallenden Restgasen die enthaltenen Katalysatorgifte zu entfernen. Das System besteht aus drei Anlagenbereichen – der Anlage 1, der Anlage 2, der Anlage 3, sowie zwei voneinander abhängigen Mischgasschienen (MG1 und MG2).

Die Modellierung des Rest- und Mischgassystems soll Bestandteil der OptiApp, entwickelt von Pöllabauer [1], werden. Bei der OptiApp handelt es sich um eine Applikation entwickelt in Wolfram Mathematica, die eine gesamtheitliche Optimierung einer Raffinerie ermöglicht.

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Entschwefelung des Restgases

Erdöle können je nach ihrer Herkunft bis zu 1% Schwefelverbindungen in Form von Mercaptanen (R-S-H), Thioethern (R'-S-R'') oder Heterocyclen (das Schwefelatom ist hier in einem Fünfer- bzw. Sechsering eingebunden) beinhalten. Dieser Schwefel muss entfernt werden, da sonst bei der späteren Verbrennung des Treibstoffes nach (2-1) Schwefeldioxid entsteht [2].



Aus diesem Grund werden die Kraftstofffraktionen der Rohöldestillation mit Wasserstoff behandelt und so die Schwefelverbindungen aufgebrochen. Neben H<sub>2</sub>S entstehen auch kurzkettige Kohlenwasserstoffe, welche im Folgenden als Restgase bezeichnet werden. Der Schwefelwasserstoff wird im Anschluss aus den Restgasen in den Waschanlagen mit Diglykolamin herausgewaschen (physikalische Absorption). Das H<sub>2</sub>S wird bei der Regenerierung der beladenen Waschlösung wieder ausgetrieben und nach dem Clausverfahren (partielle Oxidation von H<sub>2</sub>S) (2-2) zu elementarem Schwefel verarbeitet [3].



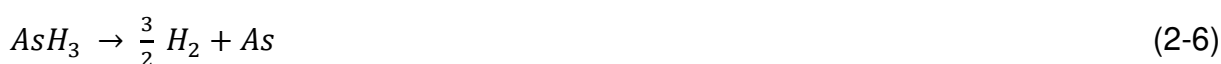
Das nicht ausgewaschene H<sub>2</sub>S im Restgas wird in einem nächsten Schritt nochmal in eine Waschkolonne geleitet und dort mit Natronlauge gewaschen. Der Schwefelwasserstoff reagiert mit der Natronlauge nach (2-3) [3].



Das noch in sehr geringem Anteil im Restgas enthaltene H<sub>2</sub>S bzw. Mercaptane werden im Laufe des Prozesses endgültig in den Arsenreaktoren der Anlage 2 bzw. Anlage 3 aus dem Gas entfernt.

### 2.1.2 Arsenreaktoren

In den Restgasen befinden sich nicht nur problematische Schwefelverbindungen, sondern auch Arsenhydride. Diese Verbindungen sind Katalysatorgifte, die mit der Katalysatoroberfläche reagieren und sich ablagern. Der Effekt wäre, dass der Katalysator seine Wirkung verliert und somit unbrauchbar wird. Da vom Rest- und Mischgassystem die C2 Plus Ströme der Anlage 2 und der Anlage 3 zur Anlage 12 weitergeleitet werden und die enthaltenen Katalysatorgifte dort teure Katalysatoren beschädigen würden, sind in der Anlage 2 und Anlage 3 Arsenreaktoren mit einem vergleichsweise billigen Katalysator (Opferkatalysator) in den Prozess integriert.



Diese Reaktoren sind mit Katalysatorkugeln (Trägermaterial: 40% ZnO und 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, aktive Komponente 40% CuO) befüllt, welche mit dem in geringen Mengen enthaltenen Arsenhydrid AsH<sub>3</sub> reagieren und so das Arsen aus dem Gasstrom abscheiden. Das Arsenhydrid kann nach (2-4), (2-5), oder (2-6) reagieren. Ferner werden auch die noch im Gasstrom befindlichen Schwefelverbindungen (vor allem Mercaptane, die sich mit Wasser bzw. Lauge kaum auswaschen lassen) entfernt [4].

### 2.1.3 Fackelgas

Aufgrund des vorliegenden Druckniveaus unterliegen fast alle Rohrleitungen, sämtliche Behälter und Kolonnen der Druckgeräteverordnung (DG-VO) und müssen entsprechend mit Berstscheiben bzw. mit Sicherheitsventilen geschützt werden. Dabei

soll ein Überschreiten des maximalen zulässigen Druckes und damit Materialversagen und Zerstörung des entsprechenden Elementes verhindert werden. Öffnet sich also ein Sicherheitsventil bedingt durch einen zu hohen Druck im System, so wird das überschüssige Gas in das sogenannte Fackelgassystem geleitet. Steigt der Druck in diesem Netzwerk auf etwa 150 mbar an, so springen am Fackelfeld die Bodenfackeln an und verbrennen unter Beaufschlagung von Erdgas das sogenannte Fackelgas. Bei einer weiteren Druckerhöhung stehen weitere Hochfackeln zur Verfügung.

Das Verbrennen überschüssiger Gase stellt eine unverzichtbare Sicherheitsmaßnahme dar, auf welche im Betrieb nicht verzichtet werden kann. Dennoch ist der Vorgang weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll und daher unerwünscht, weshalb Teile des anfallenden Fackelgases wieder komprimiert und dem Rest- und Mischgassystem rückgeführt werden. Aus der eben erklärten Funktion des Fackelgassystems zeigt sich, dass das Rest- und Mischgassystem wesentlich mit dem Fackelgassystem verflochten ist und somit berücksichtigt werden muss. In Abb. 2-1 ist schematisch das Fackelgasnetzwerk dargestellt.

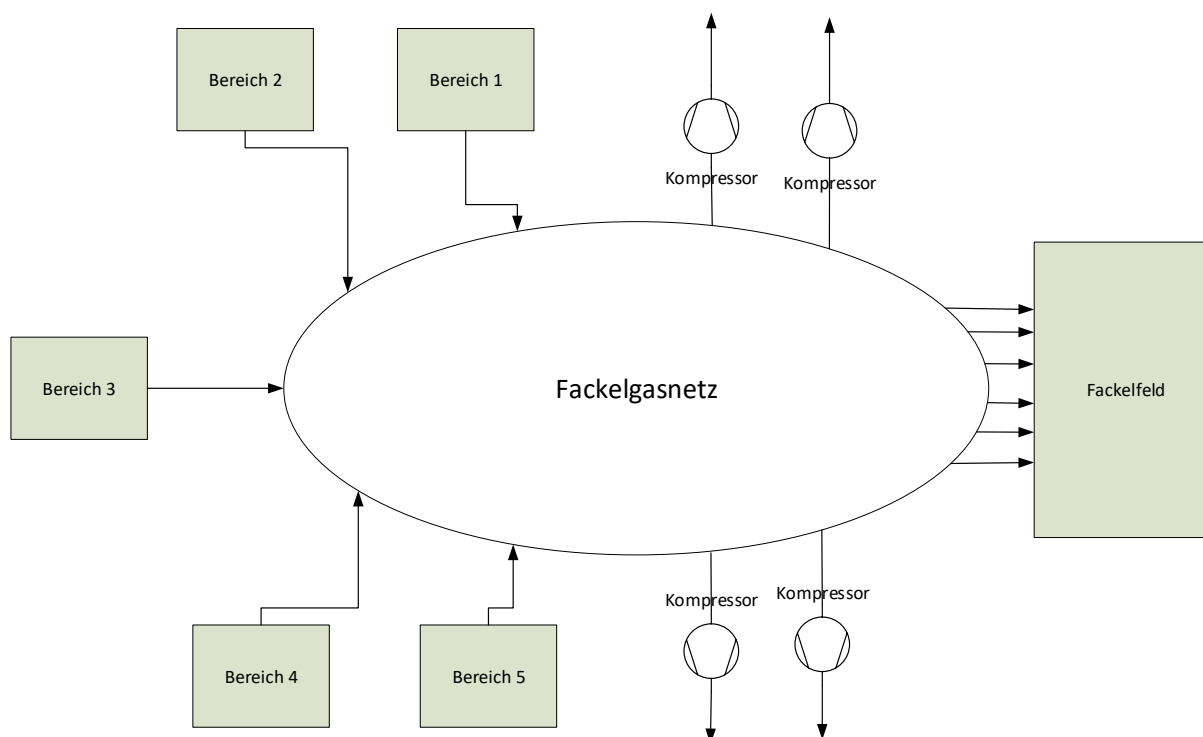


Abb. 2-1: schematische Darstellung des Fackelgasnetzwerkes. Ein Teil des Fackelgases wird durch Kompressoren verdichtet und dem Rest- und Mischgassystem zugeführt. Das restliche Gas wird zum Fackelfeld geführt und verbrannt.

## 2.2 Anlage 1

Die Restgase aus der Anlage 10, der Anlage 4 und der Anlage 11 werden gemischt, zur Anlage 1 geleitet und dort mit Mittelbenzin in der Kolonne 1 gewaschen. Dadurch werden wertvolle LPG-Bestandteile (Liquid Purge Gas - C3, C4, ...) in der Absorptionskolonne mit 8 Böden ins Benzin gelöst. Das so angereicherte Benzin (rich Mittelbenzin) wird im Anschluss in der Anlage 12 weiterverarbeitet.

Das gewaschene Restgas wird aufgeteilt in zwei Recycleströme und mit den Restgasen aus der Anlage 4 und der Anlage 11 gemischt und der Anlage 3 zugeführt.

## 2.3 Anlage 2

Die Funktionsweise von Anlage 2 und Anlage 3 ist grundsätzlich die Gleiche.

Zu Beginn wird ein schwefelhaltiger Teilstrom von der Anlage 8 in der Kolonne 2 mit Lauge gewaschen. Das gereinigte Restgas wird in den Wärmetauschern 1 und 2 vorgekühlt und im Abscheider 1 vorentwässert. Im Behälter 1 A bzw. 1 B (es handelt sich um zwei parallel geschaltete Kessel) wird das Restgas mithilfe von Zeolithen getrocknet. Wenn das Zeolith gesättigt ist, wird der Gasstrom auf den frisch regenerierten Behälter umgeschaltet und der andere Behälter mit Regeneriergas (trockenes Erdgas) getrocknet.

Die Entwässerung des Restgases ist wichtig um im Anschluss eine Vereisung zu vermeiden, da im darauffolgenden Schritt das Restgas in die Coldbox 1 zugeführt und auf etwa  $-85^{\circ}\text{C}$  abgekühlt wird. Eine Vereisung lässt sich durch die Trocknung des Restgases aber nicht vollständig vermeiden. Zur Abhilfe wird bei Bedarf stoßweise Methanol zugeführt, um die Vereisungen wieder zu entfernen. Das abgekühlte Restgas wird in den Entmethaner 1 geflasht, wobei sich hier der Feed auftrennt in einen gasförmigen C1 Minus Strom (Wasserstoff, Stickstoff, Methan, ...) und einen flüssigen C2 Plus Strom (Ethan, Propan, Butan, ...). Diese Ströme werden wieder durch die Coldbox geführt und in den Wärmetauschern 1 und 2 weiter aufgewärmt.

Der aufgewärmte C2 Plus Strom wird über die Arsenreaktoren 1 A/1 B geführt und die enthaltenen Katalysatorgifte entfernt.

Der C2 Plus Strom verlässt die Anlagengrenze des Rest- und Mischgassystems Richtung Kolonne 3.

Der C1 Minus Strom wird mit einem in der Anlage 3 anfallenden C1 Minus Teilstrom und einem in der Anlage 3 anfallenden C2 Plus Teilstrom gemischt und auf die Mischgasschiene 1 und Mischgasschiene 2 aufgeteilt.

## 2.4 Anlage 3

Die Restgasströme von der Anlage 11 und der Anlage 4 werden in der Kolonne 4 mit Wasser gewaschen. Nach den Abscheidern 2 und 3 wird der Strom auf 20 bara verdichtet (Kompressor I) und im Wärmetauscher 3 gekühlt. Ein Teilstrom des gekühlten Stromes wird zum Abscheider 3 als Recycle zurückgeführt. Der zweite Teilstrom wird zu den Wärmetauschern 4 und 5 weitergeleitet und vorgekühlt. Im Abscheider 4 wird der Gasstrom vorentwässert, im Behälter 2 A bzw. 2 B mit Zeolith getrocknet (es handelt sich um zwei parallel geschaltete Kessel) und der Coldbox 2 zugeführt und auf etwa  $-85^{\circ}\text{C}$  abgekühlt. Im Entmethaner 2 wird der Strom wieder aufgetrennt in einen C1 Minus Strom und einem C2 Plus Strom und in die Coldbox 2 zurückgeleitet. Eine weitere Erwärmung beider Ströme erfolgt in den Wärmetauschern 3 und 4.

Ein Teilstrom vom C1 Minus Strom wird in der Anlage 2 mit dem C2 Plus Strom gemischt. Der andere Teilstrom wird mit dem C1 Minus Teilstrom aus der Anlage 2 und einem Teilstrom des C2 Plus Stromes (bereits frei von Katalysatorgift) aus der Anlage 3 gemischt und auf die Mischgasschiene 1 und Mischgasschiene 2 aufgeteilt.

Der C2 Plus Strom wird nach dem Wärmetauscher 4 und den Abscheidern 5 und 6 auf 7,0 bara verdichtet (Kompressor 2) und in der Kolonne 5 mit Wasser und Lauge gewaschen und im Arsenreaktor 2 A bzw. 2 B entgiftet. Der C2 Plus Strom verlässt die Anlagengrenze Richtung Anlage 12.

Im Vergleich zur Anlage 2 wird in der Anlage 3 ein Erdgasstrom (Strom 21) vorgekühlt und in den Abscheider 7 geflasht und so das Erdgas aufgetrennt in eine leichte und eine schwere Gasfraktion. Die leichte Gasfraktion wird mit dem C2 Plus Strom vor der Kolonne 5 gemischt, während der flüssige Strom mit den schweren Gasanteilen unmittelbar die Anlagengrenze wieder verlässt.

### 3 Bilanzierung

Um eine Implementierung eines Modells in KBC PetroSIM zu ermöglichen musste eine Systemgrenze festgesetzt und alle Ein – und Ausgangsströme bestimmt werden. Als Startpunkt wurde eine bereits in der Raffinerie vorhandene Bilanz verwendet. Die Ein – und Ausgangsströme wurden mithilfe des Prozessleitbildes, der Verfahrensfließbilder und den Ruls (Rohrleitungs- und Instrumentenfließschemas) überprüft.

Die Endverbraucher (Ausgangsströme) des Heizgases der vorhandenen Bilanz konnten nachvollzogen werden und wurden dementsprechend bis auf zwei Ströme übernommen. Aufgrund einiger Diskrepanzen bei den Eingangsströmen wurde eine engere Systemgrenze gezogen. Eine weiterer Grund für die Wahl einer neuen Systemgrenze bei den Eingangsströmen gegenüber der gegebenen Bilanz ist die Tatsache, dass sich dadurch drei Waschanlagen nicht mehr innerhalb des Systems befinden und somit nicht simuliert werden mussten. Dazu wurde für die Anlage 4 die Systemgrenze so gesetzt, dass unmittelbar der gewaschene Ausgangstrom in das Rest- und Mischgassystem eintritt. Der Strom 67 wird aus acht anderen Restgasströme, die in der Anlage 4 gewaschen werden (siehe Abb. 7-1), berechnet.

Bei der Bilanzierung wurden in Summe acht Szenarien erarbeitet, statistisch ausgewertet und miteinander verglichen, um die geeignetste Bilanzgrenze zu ermitteln und so die entsprechenden Ein- und Ausgangsströme für das Modell zu eruieren. Dazu wurden bei den Eingangs- und Ausgangsströmen jeweils zwei Systemgrenzen betrachtet. Zusätzlich wurden zu den sich ergebenden Fällen am Ausgang jeweils einmal das Fackelgas berücksichtigt und einmal vernachlässigt. Diese Vorgangsweise wird durch die Komplexität des Fackelgassystems begründet, da Fackelgas in der Regel unregelmäßig an verschiedensten Stellen in geringen Mengen im Rest- und Mischgassystem anfällt.

Deshalb wurde in Szenarien, wo das Fackelgas am Ausgang berücksichtigt wird, näherungsweise die Durchflussmenge verwendet, die direkt zu den Fackeln führt. Dadurch lässt sich die unzählige Anzahl an Stoffströmen, welche zum Teil unregelmäßig anfallen, auf sechs, regelmäßig anfallende und erfassbare Stoffströme reduzieren (2 Bodenfackeln und 4 Hochfackeln). Problematisch an dieser Methodik ist

jedoch die Tatsache, dass nicht nur innerhalb des Rest- und Mischgassystems Fackelgas anfällt, sondern auch außerhalb der betrachteten Systemgrenzen. Es lässt sich also nicht eindeutig bestimmen, welche Mengen an überschüssigen Gasen an welchen Stellen aus dem Rest- und Mischgassystem austreten und ins Fackelgasnetz eingespeist werden.

Im Gegensatz zu den Ausgangsströmen des Fackelgases werden die komprimierten Fackelgasströme, welche dem Rest- und Mischgassystem zugeführt werden, in jedem Szenario berücksichtigt, da sie regelmäßig anfallen und eindeutig dem Rest- und Mischgassystem zugeordnet werden können. Die sich kombinatorisch ergebenden acht Szenarien sind in Tab. 3-1 aufgelistet. Die so entstandenen Bilanzierungsszenarien sind in Abb. 7-2 bis Abb. 7-9 als Fließbilder grafisch dargestellt.

Szenario	Eingangsströme	Ausgangsströme	Berücksichtigung
			Fackelgas
1	eigene Bilanzgrenze	Mischgasschienen	ja
2	eigene Bilanzgrenze	Endverbraucher	ja
3	eigene Bilanzgrenze	Mischgasschienen	nein
4	eigene Bilanzgrenze	Endverbraucher	nein
5	vorhandene Bilanzgrenze	Mischgasschienen	ja
6	vorhandene Bilanzgrenze	Endverbraucher	ja
7	vorhandene Bilanzgrenze	Mischgasschienen	nein
8	vorhandene Bilanzgrenze	Endverbraucher	nein

Tab. 3-1: Bilanzierungsszenarien

Für die 8 Bilanzierungsszenarien wurden im Zeitraum vom 01.01.2012 (Uhrzeit: 00:00) bis zum 31.12.2017 (Uhrzeit: 23:00) auf Basis von Stundenwerten die Summe aller Eingangsströme, die Summe aller Ausgangsströme und die absoluten Fehler daraus nach (3-1) gebildet. Der relative Fehler wurde aus dem absoluten Fehler, bezogen auf die Eingangsströme, berechnet nach (3-2).

Von den Ein- und Ausgangsströmen, den absoluten Fehlern und den relativen Fehlern wurde der Mittelwert berechnet. Des Weiteren wurde die Standardabweichung für die Ein- und Ausgangsströme und den absoluten und relativen Fehlern berechnet.

$$\text{absoluter Fehler} = \dot{m}_{aus} - \dot{m}_{ein} \quad (3-1)$$

$$\text{relativer Fehler} = \frac{\text{absoluter Fehler}}{\dot{m}_{ein}} * 100\% \quad (3-2)$$

Weiters wurden Histogramme erstellt (Abb. 7-10 - Abb. 7-33). Auf Basis der Ergebnisse wurde das Bilanzierungsszenario 4 als das Geeignetste angesehen (Begründung siehe 5.1).

Es stellt sich grundsätzlich die Frage, ob die Stundenwerte genau genug sind oder ob Werte verwendet werden müssen, die in kürzeren Abständen erfasst wurden. Aus diesem Grund wurde analog eine statistische Auswertung mit 1h-Werten, 12min-Werten und 6min-Werten für Szenario 4 durchgeführt und in Kapitel 5.1 interpretiert. Als Zeitraum wurde der 01.01.2016 (00:00) bis 04.04.2017 (00:00) gewählt. Die gemittelten Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in Tab. 5-3 dargestellt (die dazugehörigen Histogramme sind in Abb. 5-4 bis Abb. 5-15 zu finden).



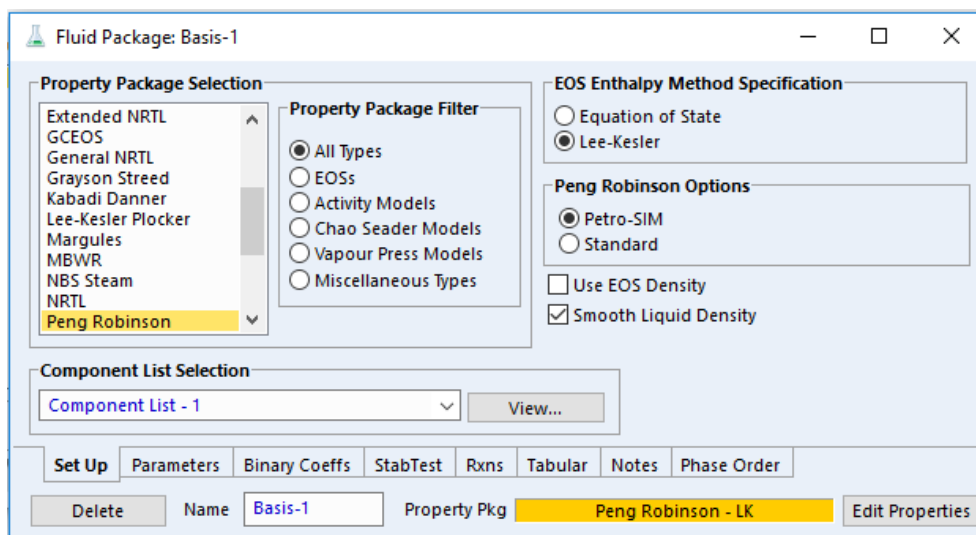
## 4 Modellierung und Validierung

Das Modell wurde in KBC PetroSIM implementiert. Das Programm ist derart aufgebaut, dass zu Beginn das thermodynamische Modell, die vorkommenden Komponenten und auftretende Reaktionen definiert werden. Nach der Deklaration der genannten Punkte kann auf die Simulierebene (Simulation Environment) gewechselt werden. In dieser Umgebung ist es jetzt möglich, aus einer Palette die gewünschten Unit Operations auf die Oberfläche via „Drag and Drop“ einzufügen. Diese Unit Operations können miteinander verbunden werden durch das Einfügen von Stoffströmen, welche anschließend als Ein- und Ausgangsströme der jeweiligen Unit Operations deklariert werden. Am Anfang ist jede erstellte Simulation statisch. Das bedeutet, dass sich das System stets in einem statischen Zustand befindet und somit keine Variablen zeitabhängig sind.

Erst nachdem ein Modell statisch konvergiert ist empfiehlt es sich die statische Simulation in eine dynamische Simulation zu überführen. Dazu müssen Spezifikationen gesetzt werden, um das gesamte System beschreiben zu können. Man spricht auch von den Freiheitsgraden. Ein System mit einer Anzahl von Null Freiheitsgraden lässt sich eindeutig bestimmen. Bei Freiheitsgraden größer Null spricht man von einem überbestimmten System. Solche Systeme lassen sich nicht beschreiben, da Informationen fehlen und ferner die Massen-, Gleichgewichts- und Energiegleichungen sowie die Summationsbedingungen nicht gelöst werden können (MESH-equations (mass, equilibrium, summation and heat equations)). Bei Freiheitsgraden kleiner Null ist das System überspezifiziert und es kann zu Inkonsistenzen führen, da sich bestimmte Variablen auf mehrere Wege berechnen lassen und keinen eindeutigen Wert einnehmen können. Dieses Problem tritt auch auf, wenn ein System sehr komplex wird, da die Übersicht über die spezifizierten Werte schnell verloren gehen kann [5].

Für die Simulation des Netzwerkes wurde die kubische Zustandsgleichung von Peng-Robinson mit der Berechnungsmethode für die Enthalpie nach Lee-Kesler gewählt, da im System hauptsächlich gasförmige Ströme vorkommen und sich Peng-Robinson gut für Kohlenwasserstoffe eignet (siehe Abb. 4-1) [6]. Eine Ausnahme stellt die Waschkolonne D9450 dar, welche mit dem Aktivitätskoeffizientenmodell NRTL simuliert wird um die Flüssigphase genauer berechnen zu können. Auf Basis der Entscheidung, die Gesamtbilanz nach Szenario 4 zu verwenden, wurden die Ein-

und Ausgangsströme in das Modell implementiert. Bei den Eingangsströmen wurde die Temperatur, der Druck und der Massenstrom spezifiziert, während bei den Ausgangsströmen nur der Massenstrom spezifiziert wurde. Die genannten spezifizierten Werte wurden von Mathematica für den ausgewählten Zeitpunkt über die Schnittstel-



le zu KBC PetroSIM übertragen.

Abb. 4-1: Wahl der Zustandsgleichung (Fluid Package)

Eine Ausnahme bei den Eingangsströmen stellen die Ströme 9 und 12 dar. Bei diesen Strömen wurde die Massensstromspezifikation entfernt und bei den entsprechenden Ventilen „VLV-115“ und „VLV-120“ die Druck-Fluss-Spezifikation vorgegeben, da die Drücke in der Mischgasschiene 1 und 2 über die genannten Ventile geregelt werden. Eine Möglichkeit der Validierung des Modells auf seine Richtigkeit kann über den Vergleich der simulierten Massenströme (diese Ströme werden berechnet) mit den gemessenen Massenströmen erfolgen.

Bei den Ausgangsströmen stellen die C2 Plus Ströme aus der Anlage 2 und der Anlage 3 eine Ausnahme da. Bei den genannten Strömen wurde anstatt der Massenspezifikationen die Druckspezifikationen gesetzt, um dem System die Möglichkeit zu geben, sich bei den genannten Strömen ausgleichen zu können. Auch hier kann das Modell auf seine Richtigkeit durch den Vergleich der simulierten Massenströme und der tatsächlich, gemessenen Massenströme validiert werden. Abb. 4-2 zeigt den wesentlichen Aufbau des Modells. Zu Beginn wurden im Sub-Flowsheet „Rohrleitungen vor MG-Schienen“ alle Rohrleitungen vor den Anlagen 1, 2 und 3 implementiert.

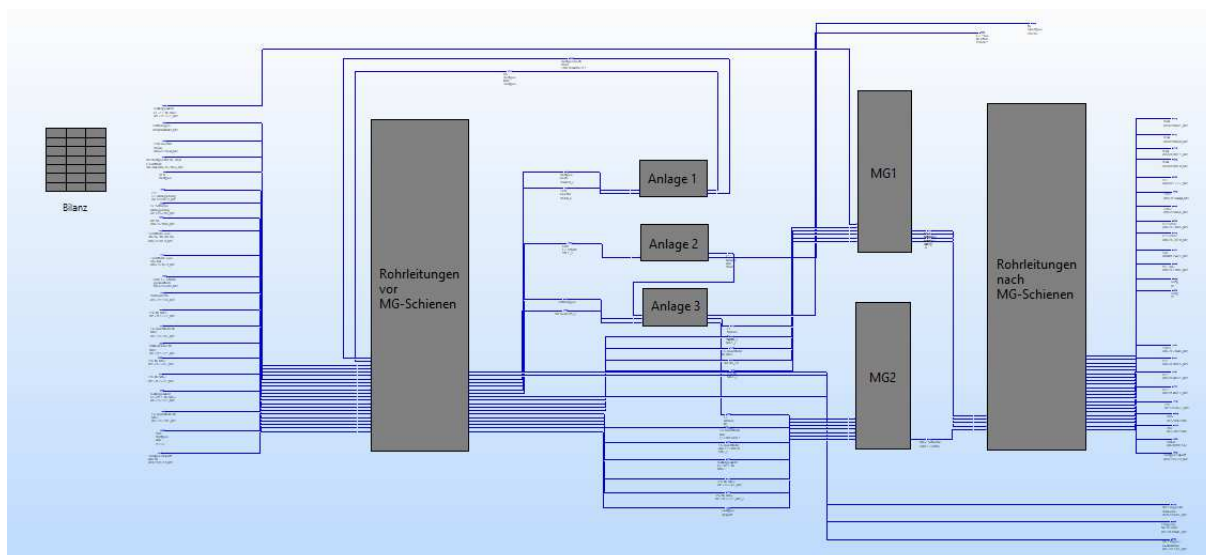


Abb. 4-2: Grundsätzlicher Aufbau des Modells

Dazu war es notwendig mithilfe des Prozessleitbildes, der Verfahrensfließbilder und der Ruls zu bestimmen wie die Rohrleitungen untereinander vernetzt sind. Analog wurden im Sub-Flowsheet „Rohrleitungen nach MG-Schienen“ die Rohrleitungen implementiert. Die Länge der Rohre, deren Durchmesser, Wanddicke und Dämmung wurden teilweise aus den Ruls, den entsprechenden Rohrleitungsisometrien und einer Datenbank bestimmt. Für die Berechnung des Druckverlustes durch das Rohr wurde die Korrelation (Pipe Flow Correlation) von Beggs und Brill verwendet (siehe Abb. 4-3).

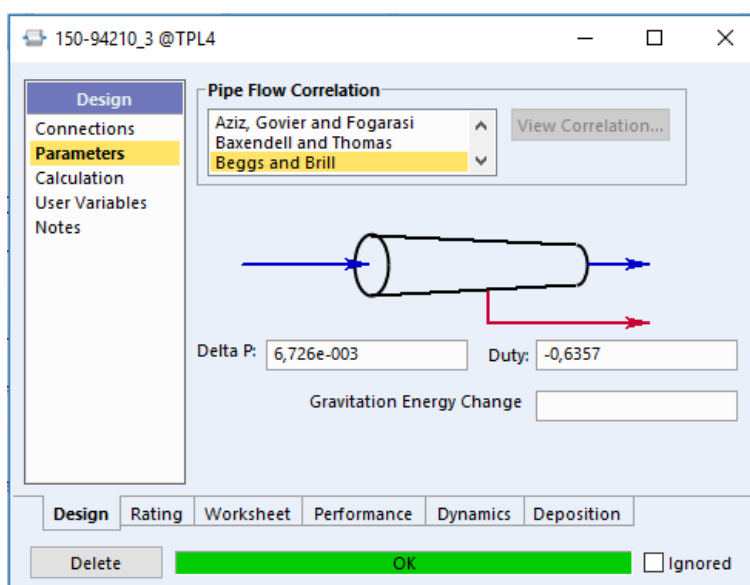


Abb. 4-3: Auswahl der Korrelation zur Berechnung des Druckverlustes durch die Rohrströmung

Für die Abschätzung der Wärmeverluste der Rohre wurde der Wärmeübertragungskoeffizienten für das Innenrohr mit der Korrelation von Profes abgeschätzt. Der äußere Wärmeübertragungskoeffizient wurde mit der globalen Methode abgeschätzt, wobei außen Luft mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s strömt und die Außentemperatur 25°C betragen soll (siehe Abb. 4-4)

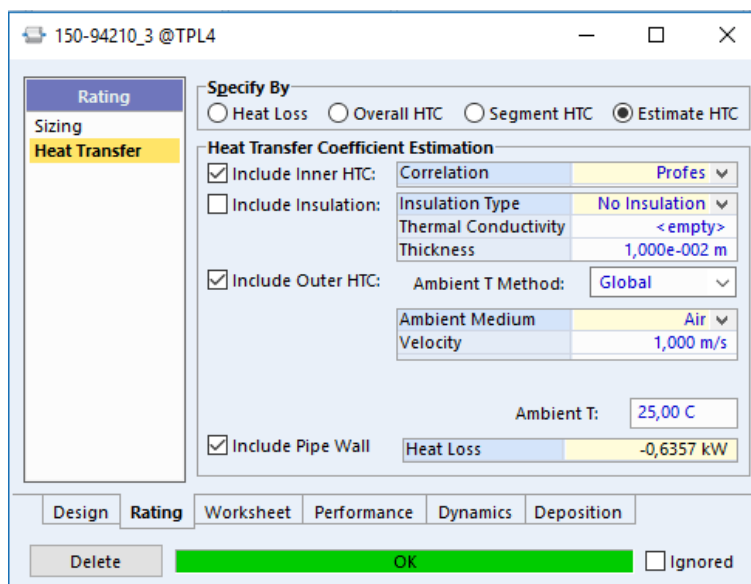


Abb. 4-4: Auswahl der Korrelation zur Berechnung des Wärmeverlustes am Rohr

In den Sub-Flowsheets „Anlage 1“, „Anlage 2“ und „Anlage 3“ wurden, wie in den Unterkapiteln 2.2, 2.3 und 2.4 beschrieben, die entsprechenden Prozesse implementiert.

In den Sub-Flowsheets „MG1“ und „MG2“ werden alle Gasströme, die zu den Mischgasstationen gehen, gesammelt und über die Mischgasschienen zu den Endverbrauchern geleitet. In Abb. 4-2 lässt sich erkennen, dass vom Sub-Flowsheet „Rohrleitungen vor MG-Schienen“ drei Ströme entspringen, welche unterhalb der Sub-Flowsheets „MG2“ und „Rohrleitungen nach MG-Schienen“ verlaufen. Dabei handelt es sich um die Ströme 50, 51 und 52 welche die entsprechenden Anlagen nicht mit Heizgas, sondern mit Niederdruckerdgas versorgen.

Beim ursprünglichen Modell wurde beobachtet, wenn dem Rest- und Mischgasnetzwerk mehr Gas zugeführt als abgeführt wird (diese Situation entsteht, wenn einige

große Mischgasverbraucher ausfallen), dass es dann im Modell in der Anlage 2 und 3, sowie der Mischgasschiene 1 und Mischgasschiene 2 zu einer stetigen Druckerhöhung kommt. Um dem entgegenzuwirken wurden vor den jeweiligen Entmethanern in Anlage 2 und 3 sowie bei den Mischgasschienen Ventile implementiert, welche das Druckniveau regeln und einen derartigen Druckaufbau durch Ablassen des überschüssigen Gases verhindern.

Weiters wurde das Spreadsheet „Bilanz“ implementiert. In diesem Spreadsheet werden zu jedem Zeitpunkt der dynamischen Simulation von den jeweiligen Strömen der Massenstrom, der Druck und die Temperatur übertragen. Im Spreadsheet wird neben der linearen Berechnung der Menge an Mittelbenzin in Anlage 1 eine Bilanzierung der Hauptströme und eine Bilanzierung der Gesamtströme durchgeführt. Bei den Hauptströmen handelt es sich um die in der Bilanzierung deklarierten Ein- und Ausgangsströme. Bei den Gesamtströmen werden weiters sämtliche Betriebsmittelströme und Abfallströme (Slops, verschmutzte Abwässer) berücksichtigt.

Im Folgenden werden die Annahmen aufgezählt, die in dem Modell getroffen wurden:

- Schwefelverbindungen und  $\text{AsH}_3$  in den Zusammensetzungen der Gasströme wurden nicht berücksichtigt, da die Konzentration sehr gering (200-ppm M Schwefelwasserstoff, 50 ppm-M Mercaptane und 10 ppb-M Arsen als maximale Erwartungswerte) ist. Das hat den Vorteil in den Waschkolonnen nicht die Reaktion (2-3) simulieren zu müssen. Als weitere Vereinfachung wurden bei den Kolonnen 2, 4 und 5 alle Laugenströme durch Wasserströme mit gleichem Druck, Temperatur und Massenstrom ersetzt und angenommen, dass in jeder Situation das  $\text{H}_2\text{S}$  hinreichend ausgewaschen wird und die maximal zulässige Schwefelkonzentration eingehalten wird. Ferner muss in den Arsenreaktoren die Reaktion vom Arsenhydrid mit dem Katalysator nicht abgebildet werden, da durch die geringe Konzentration der genannten Komponenten ein vernachlässigbar kleiner Massenverlust auftreten würde. Deswegen wurden im Modell die Arsenreaktoren symbolhaft durch Separatoren abgebildet.
- Geodätische Höhenunterschiede wurden vernachlässigt.

- Die Cold-Boxen 1 und 2 wurden weggelassen und vereinfachend jeder Strang, der durch eine Coldbox gehen würde, durch einen Erhitzer bzw. Kühler (Unit Operation (UOP) Heater und Cooler) auf die gewünschte Betriebstemperatur temperiert.
- Alle Rohrleitungen (Ausnahme: Hochdruckleitungen vom Erdgas), die dem System zugeführt oder abgezweigt werden und einen Nenndurchmesser von 25 mm oder kleiner haben, wurden vernachlässigt.
- Alle Rohrleitungen, die den Anlagen Zündgas bereitstellen, wurden nicht berücksichtigt, da ein Anfahrvorgang unregelmäßig erfolgt und nicht dem normalen Betrieb entspricht. Außerdem sind die Gasmengen vergleichsweise gering und somit vernachlässigbar.
- In den zwei Mischgasstationen gibt es jeweils ein Rohr mit einer Länge von ungefähr 15 Meter. Entlang dieses Rohres werden an verschiedenen Rohrabschnitte die Rest- und Erdgasströme zugeführt und das Heizgas auch wieder abgeführt. Die Eingangsströme in die Mischgasstation wurden als Vereinfachung zu Beginn in einem Mischer gemischt. Es wurden also die genannten Rohre auf Punkte reduziert (siehe Abb. 4-5 und Abb. 4-6).
- Bei den real in der Raffinerie eingesetzten Trocknern 1 A/B und 2 A/B wird im Betrieb immer eine geringe Restfeuchte im Restgas verbleiben. Im Modell wird die gesamte Restfeuchte durch die Wahl eines Component Splitters entfernt.
- In der RGOA wird bei der Kolonne 1 der Massenstrom des Mittelbenzins linear in Abhängigkeit vom auszuwaschenden Gasstroms berechnet.
- Die Waschwasserströme der Waschkolonnen 2, 4 und 5 sind konstant.
- Rohrbögen wurden nicht berücksichtigt da die Ströme gasförmig sind und deswegen der Druckverlust durch Rohrbögen vernachlässigbar klein ist.
- Die Zusammensetzungen der Eingangsströme wurden aus den Betriebshandbüchern der Raffinerie entnommen und sollen zu jedem Zeitpunkt konstant sein.

- Die Temperaturen und Drücke der Betriebsmittel, sowie der Hauptströme (beispielsweise nach einem Verdichter oder nach einem Wärmetauscher) im Modell wurden auf Basis der Aufzeichnungen der vergangenen Jahre gemittelt und festgelegt. Sie sollen für jede Simulation als konstant angesehen werden.

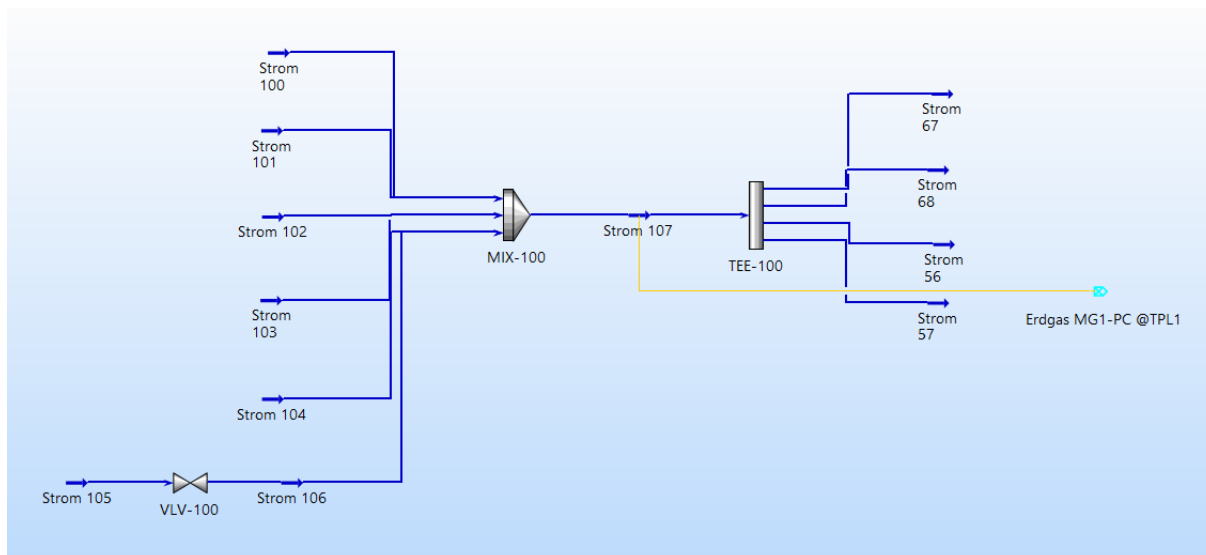


Abb. 4-5: Mischgasschiene 1 – alle Rest- und Erdgasströme wurden an einem Punkt gemischt

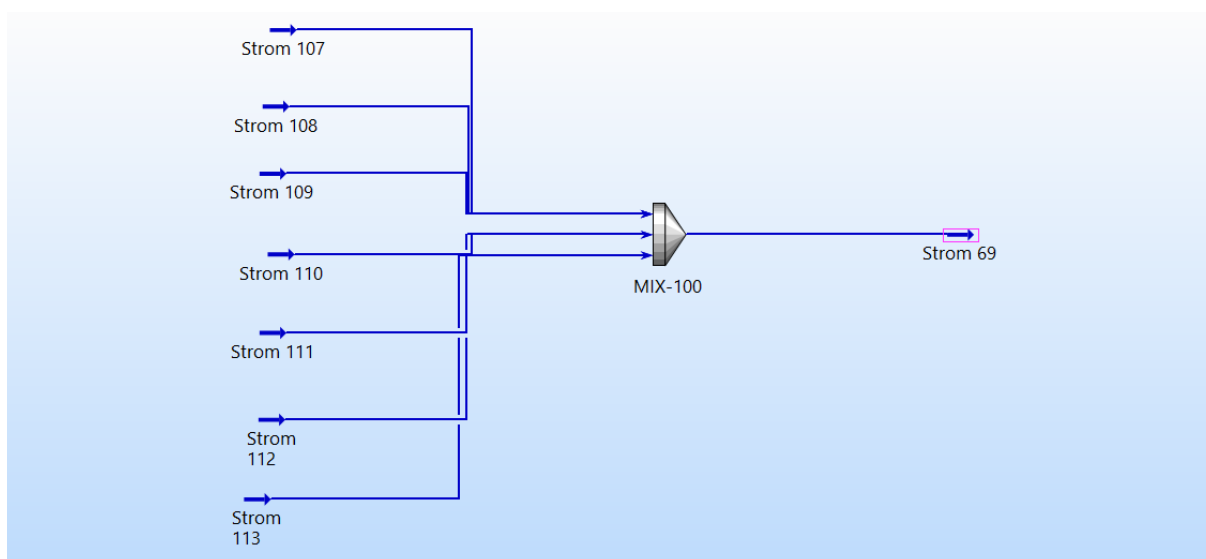


Abb. 4-6: Mischgasschiene 2 – alle Rest- und Erdgasströme wurden an einem Punkt gemischt

Die Schnittstelle zwischen Wolfram Mathematica und KBC PetroSIM wurde von der Konstruktionsübung von Tausendschön [7] adaptiert und ermöglicht die Einbettung in die OptiApp von Pöllabauer [1]. Mit dieser Applikation ist es möglich, auf das Modell in PetroSIM zuzugreifen. Erst wird das Notebook geöffnet, die Werte für den gewählten Tag werden aufbereitet und anschließend dem Modell übergeben.

Weiters wurde eine, in der Konstruktionsübung von Eschböck [8], in Mathematica implementierte Funktion, welche bei Vorgabe einer Liste der Anlagen und einer Liste ihrer Verbräuche eine ABC-Analyse durchführt, übernommen und angepasst. Die ABC-Analyse kommt ursprünglich aus der Betriebswirtschaft [9]. Im Anschluss der Simulation des Rest- und Mischgassystems werden die Endverbraucher nach der Größe ihres Verbrauches geordnet, grafisch und tabellarisch dargestellt, sowie in Gruppen zusammengefasst (Gruppe A (hohe Priorität = großer Verbraucher), Gruppe B (mittlere Priorität), Gruppe C (niedrige Priorität)).

Um eine Betriebsstunde im betrachteten Zeitraum vom 01.01.2012 (Uhrzeit: 00:00) bis zum 31.12.2017 (Uhrzeit: 23:00) simulieren zu können, wurde eine Betriebsstunde gesucht, bei der alle Anlagen im Betrieb waren (alle Ein- und Ausgangsströme liefern einen Massenstrom ungleich Null). In dem betrachteten Zeitraum wurde keine einzige Betriebsstunde gefunden, welche diese Bedingung erfüllt. Deswegen wurden für den gegebenen Zeitraum für alle Ein- und Ausgangsströme die Anzahl der Stunden ermittelt, wann die Anlagen einen Massenstrom lieferten bzw. bezogen. Eine erneute ABC-Analyse wurde durchgeführt und die Ergebnisse in Abb. 7-35, Tab. 7-9 und Tab. 7-10 dargestellt.

Der Auswertung nach wurden solange die Ströme mit den geringsten Betriebsstunden vernachlässigt, bis eine Betriebsstunde gefunden wurde, in der alle betrachteten Ströme aktiv waren. Die so gefundene Betriebsstunde ist Montag, der 28.04.2014 (14:00). Die Werte dieser Betriebsstunde wurden mit Mathematica aufbereitet und über die Schnittstelle in das PetroSIM Modell übertragen. Das Modell wurde solange dynamisch simuliert, bis sich das System eingeschwungen hatte. Ausgehend von diesem Zustand wurden sämtliche Case Studies durchgeführt.



## 5 Ergebnisse

### 5.1 Bilanz

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung der 8 Szenarien sind in Tab. 5-1 und Tab. 5-2 dargestellt. Bei Betrachtung des gemittelten, relativen Fehlers zeigt sich, dass Szenario 2 mit +2,20 % das präziseste Ergebnis aufweist. Aufgrund der Tatsache, dass jedoch in Szenario 2 das Fackelgas am Ausgang berücksichtigt wird und diese Ansichtswise problematisch ist, wurde dieses Szenario nicht als das Geeignenste angesehen. Jedoch kann bei Szenario 2 auf Basis von der Auswertung die Aussage unterstützt werden, dass außerhalb des Rest- und Mischgassystems Fackelgas anfällt, da dieses Szenario im Vergleich zu Szenario 1, 3 und 4 einen positiven, relativen Fehler aufweist. Das zeigt sich auch beim Vergleich der gemittelten Ein- und Ausgangsströme. Für Szenario 2 ist der gemittelte Wert der Ausgangsströme größer als der Wert der Eingangsströme.

Unter Ausblendung von Szenario 2 zeigt sich Szenario 4 vielversprechend mit einem relativen Fehler von -2,96 %. In Szenario 4 wird auch das Fackelgas am Ausgang nicht berücksichtigt. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass die Standardabweichungen der Ausgangsströme und der absoluten Fehler bei den Szenarien, bei denen am Ausgang das Fackelgas berücksichtigt wurde, mehr als doppelt so stark streuen, als bei den Szenarien ohne Fackelgas.

Bei den Eingangsströmen lässt sich erkennen, dass die eigene Bilanz etwas geringere Werte liefert und so im Vergleich zu den Eingangsströmen der vorgegebenen Bilanz zu einem niedrigeren Fehler führt. Bei der eigenen Bilanz handelt es sich um eine enger gezogene Bilanzgrenze, als bei der in der Raffinerie bereits existierenden Bilanz der Eingangsströme.

Bei den Szenarien, wo die Mischgasschienen bereits als Ausgangsströme angenommen werden zeigt sich (Abb. 5-2 und Abb. 5-3), dass die Ausgangsströme etwas geringere Werte annehmen im Vergleich zu den Szenarien, wo die Ausgangsströme der Endverbraucher erfasst wurden. Das führt dazu, dass sich bei den Szenarien mit den Mischgasschienen als Ausgangsströme größere Fehler ergeben.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Mittelwert Eingangsströme [t/h]	49,87	49,87	49,87	49,87
Standardabweichung Eingangsströme [t/h]	7,89	7,89	7,89	7,89
Mittelwert Ausgangsströme [t/h]	48,26	50,97	45,69	48,40
Standardabweichung Ausgangsströme [t/h]	19,45	19,11	8,17	8,43
gemittelter Fehler, absolut [t/h]	-1,61	1,10	-4,18	-1,47
Standardabweichung Fehler absolut [t/h]	17,94	17,73	4,76	5,71
gemittelter Fehler, relativ (bezogen auf gemittelten Eingangsstrom) [%]	-3,22	2,20	-8,38	-2,96
Standardabweichung Fehler relativ (bezogen auf gemittelten Eingangsstrom) [%]	36,03	35,49	9,52	11,54

Tab. 5-1: Ergebnisse der Szenarien 1 - 4

	Szenario 5	Szenario 6	Szenario 7	Szenario 8
Mittelwert Eingangsströme [t/h]	54,07	54,07	54,07	54,07
Standardabweichung Eingangsströme [t/h]	8,51	8,51	8,51	8,51
Mittelwert Ausgangsströme [t/h]	48,26	50,97	45,69	48,40
Standardabweichung Ausgangsströme [t/h]	19,45	19,11	8,17	8,43
gemittelter Fehler, absolut [t/h]	-5,80	-3,10	-8,38	-5,67
Standardabweichung Fehler absolut [t/h]	17,95	17,76	4,67	5,70
gemittelter Fehler, relativ (bezogen auf gemittelten Eingangsstrom) [%]	-10,73	-5,73	-15,49	-10,49
Standardabweichung Fehler relativ (bezogen auf gemittelten Eingangsstrom) [%]	33,22	32,95	8,68	10,50

Tab. 5-2: Ergebnisse der Szenarien 5 – 8

Bei den Histogrammen in Abb. 5-1 sind die Eingangsströme nach der eigenen und der vorgegebenen Bilanz angegeben.

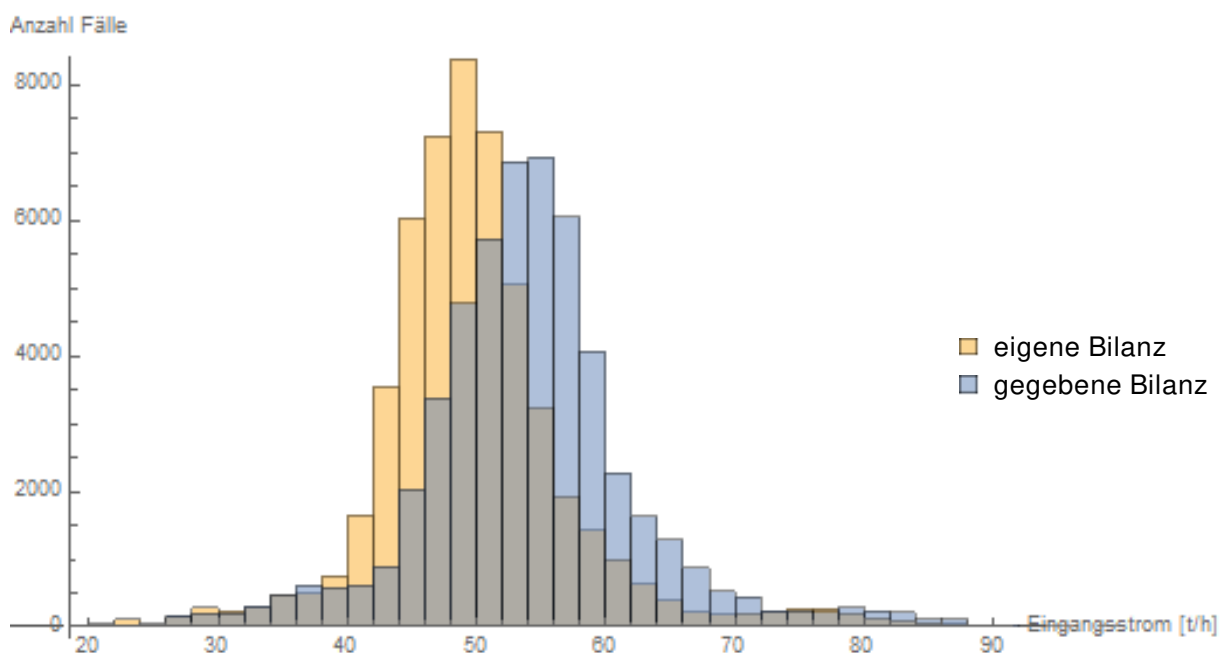


Abb. 5-1: Vergleich der Histogramme der Eingangsströme

Dabei sieht man, dass bei der eigenen Bilanz bei mehr als 8000 von 52608 Fällen die Eingangsströme knapp unter 50 Tonnen pro Stunde liegen, während bei der vorgegebenen Bilanz der Wert bei etwa 55 Tonnen pro Stunde liegt. Weiters ist die Standardabweichung der Eingangsströme in der gegebenen Bilanz etwas größer als in der eigenen, wobei sich dieser Unterschied in den Histogrammen kaum erkennen lässt.

Aufgrund der sich ergebenden Erkenntnisse aus der statistischen Auswertung wurde das Bilanzierungsszenario 4 gewählt, da die Bilanz nach Szenario 2 den kleinsten Fehler über den betrachteten Zeitraum aufweist und weiters charakterisiert ist durch vergleichsweise niedrige Standardabweichungen. Weiters werden bei diesem Szenario das Fackelgas am Ausgang vernachlässigt und die Endverbraucher an der Systemgrenze erfasst.

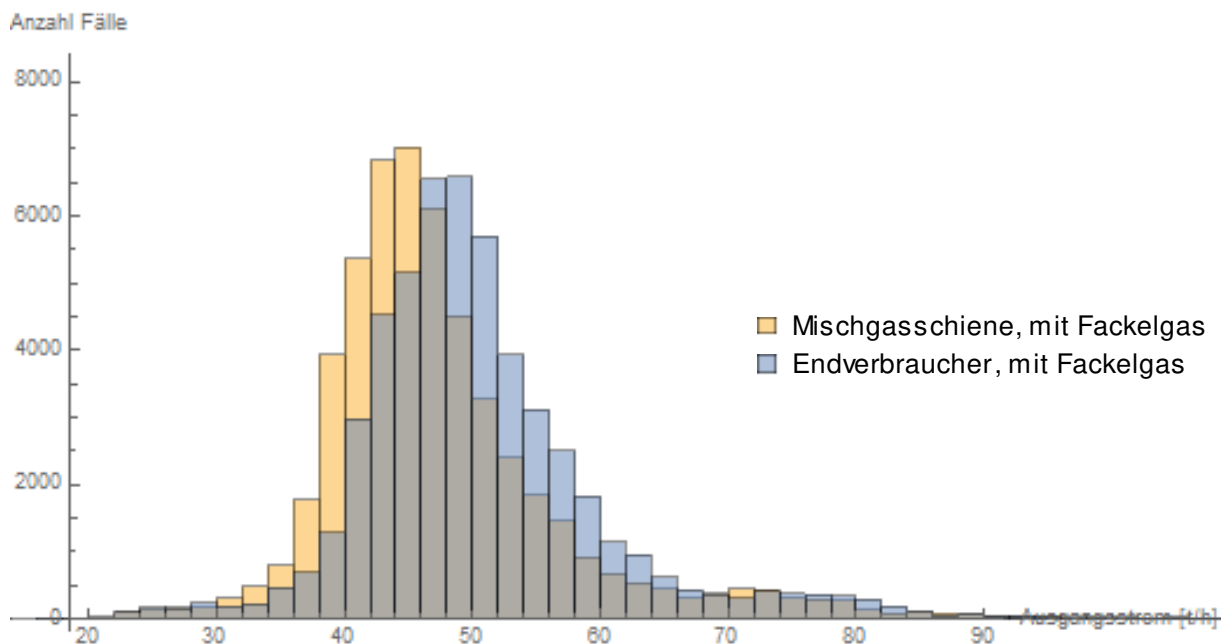


Abb. 5-2: Vergleich der Histogramme der Ausgangsströme aus Szenario 1 und 2

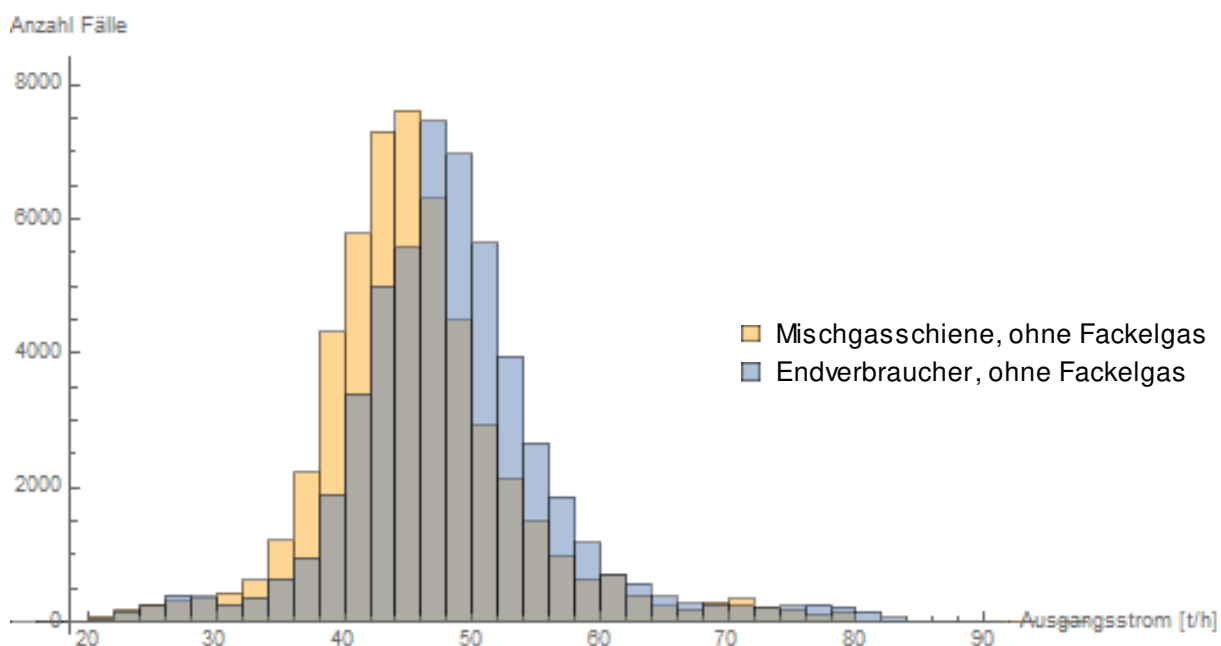


Abb. 5-3: Vergleich der Histogramme der Ausgangsströme aus Szenario 3 und 4

Eine weitere statistische Auswertung wurde durchgeführt um zu überprüfen, ob die Wahl von Stundenwerten zum Simulieren gerechtfertigt ist. Dazu wurden in einem Zeitraum von 15 Monaten die entsprechenden 1 h-Werte, 12 min-Werte und 6 min-Werte herangezogen und analog wie bei den Bilanzierungsszenarien der Mittelwert

der Summe der Eingangsströme, der Ausgangsströme, der absoluten Fehler und der relativen Fehler, sowie die Standardabweichungen der Ein- und Ausgangsströme und der relativen Fehler ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tab. 5-3 aufgelistet.

	Szenario 4, 1h	Szenario 4, 12 min	Szenario 4, 6 min
Mittelwert Eingangsströme [t/h]	50,88	51,73	51,73
Standardabweichung Eingangsströme [t/h]	6,18	4,70	4,71
Mittelwert Ausgangsströme [t/h]	49,30	48,62	48,62
Standardabweichung Ausgangsströme [t/h]	6,78	4,73	4,73
gemittelter Fehler, absolut [t/h]	-1,59	-3,11	-3,11
Standardabweichung Differenz [t/h]	6,69	3,99	4,01
gemittelter Fehler, relativ (bezogen auf gemittelten Eingangsstrom) [%]	-3,12	-6,01	-6,01
Standardabweichung Fehler relativ (bezogen auf gemittelten Eingangsstrom) [%]	13,27	7,70	7,81

Tab. 5-3: Ergebnisse von Szenario 4 für 1 h-, 12 min- und 6 min-Werte

Aus der zweiten Auswertung zeigt sich, dass sich im Vergleich zu den Stundenwerten, sich der relative Fehler für die 12 min- und 6 min-Werten zwar fast verdoppelt, mit -6,01 % aber immer noch sehr gering ist. Im Vergleich zu den Stundenwerten verringern sich andererseits die Standardabweichungen der 12 min- und 6 min-Werten um ca. 30%. Die Histogramme zeigen, dass sich die Kurvenverläufe der verschiedenen Zeitabstände ähnlich verhalten. Die Flächen unter den Kurven der Stundenwerte sind im Vergleich zu den 12 min-Werten kleiner und diese wiederum kleiner als die Flächen der 6 min-Werte. Das liegt daran, dass bei den 12 min- Werten 5-mal und bei den 6 min- Werte 10-mal so viele Werte in der Auswertung verwendet wurden. In den Histogrammen Abb. 5-4, Abb. 5-5, Abb. 5-8, Abb. 5-9, Abb. 5-12 und Abb. 5-13 lässt sich die höhere Standardabweichung durch den breiteren Peak Verlauf der Stundenwerte im Vergleich zu den anderen Werten gut erkennen. Zwischen den 12 min- und 6 min-Werten lässt sich kein nennenswerter Unterschied feststellen.

Da die Abweichungen des Fehlers und der Standardabweichung der Stundenwerte zu einer feineren zeitlichen Auflösung relativ klein bleiben, fällt die Wahl auf Stundenmittelwerte.

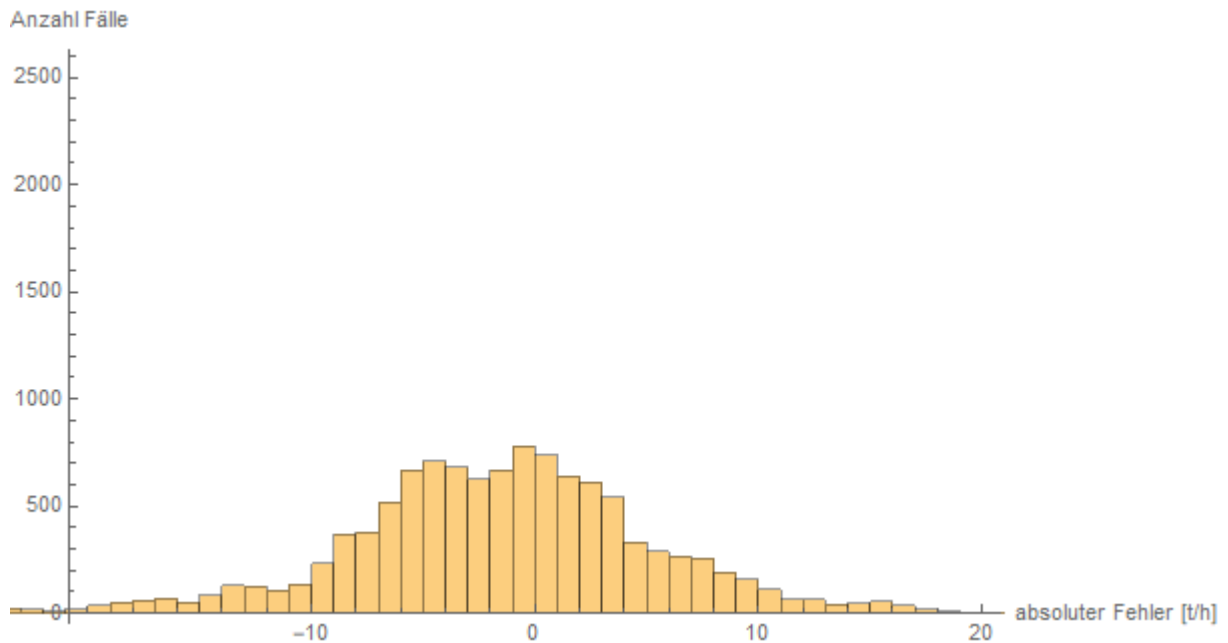


Abb. 5-4: Histogramm der absoluten Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 1h-Werten

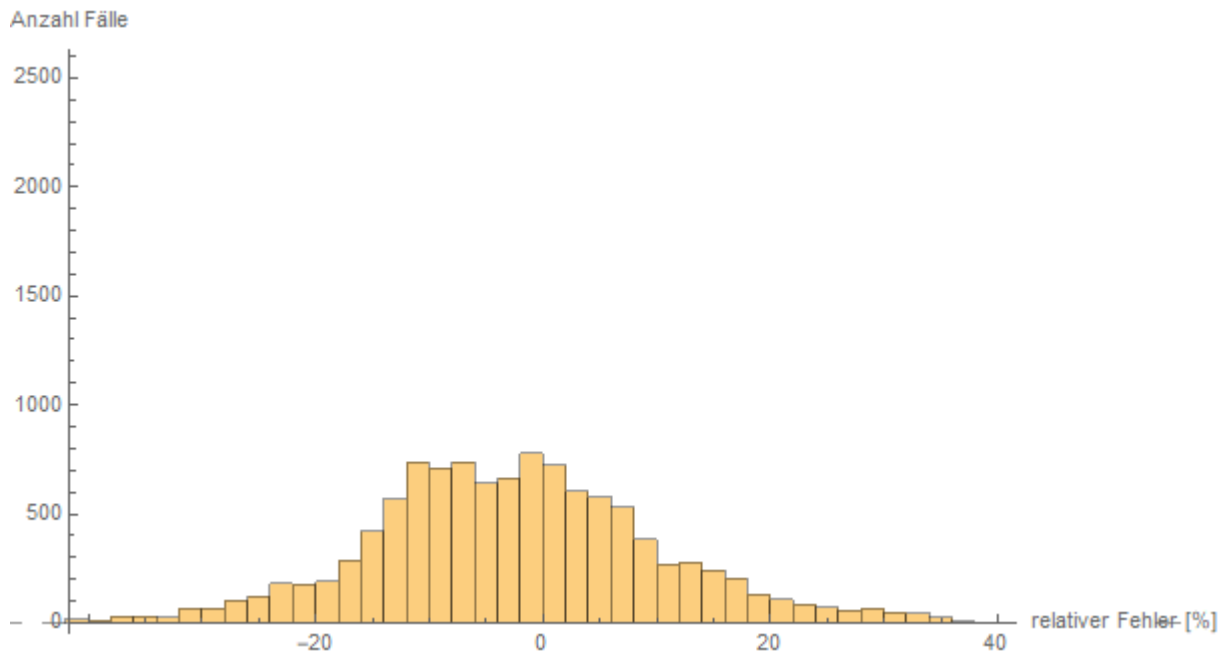


Abb. 5-5: Histogramm der relativen Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 1h-Werten

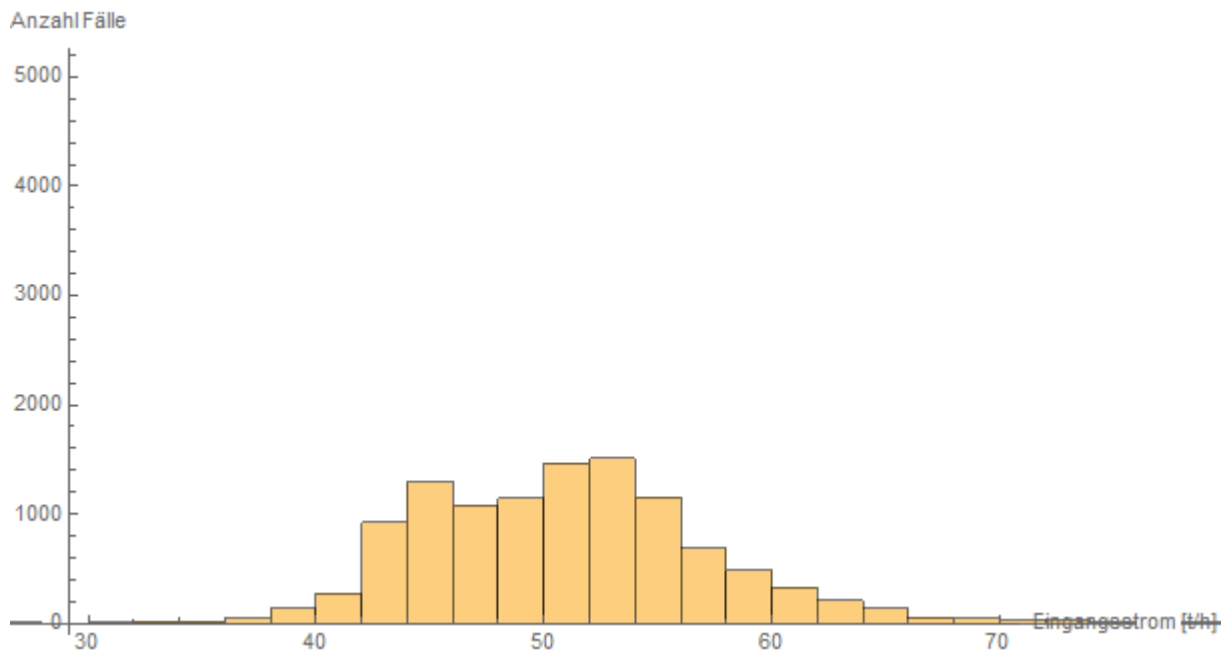


Abb. 5-6: Histogramm der Summe aller Eingangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 1h-Werten

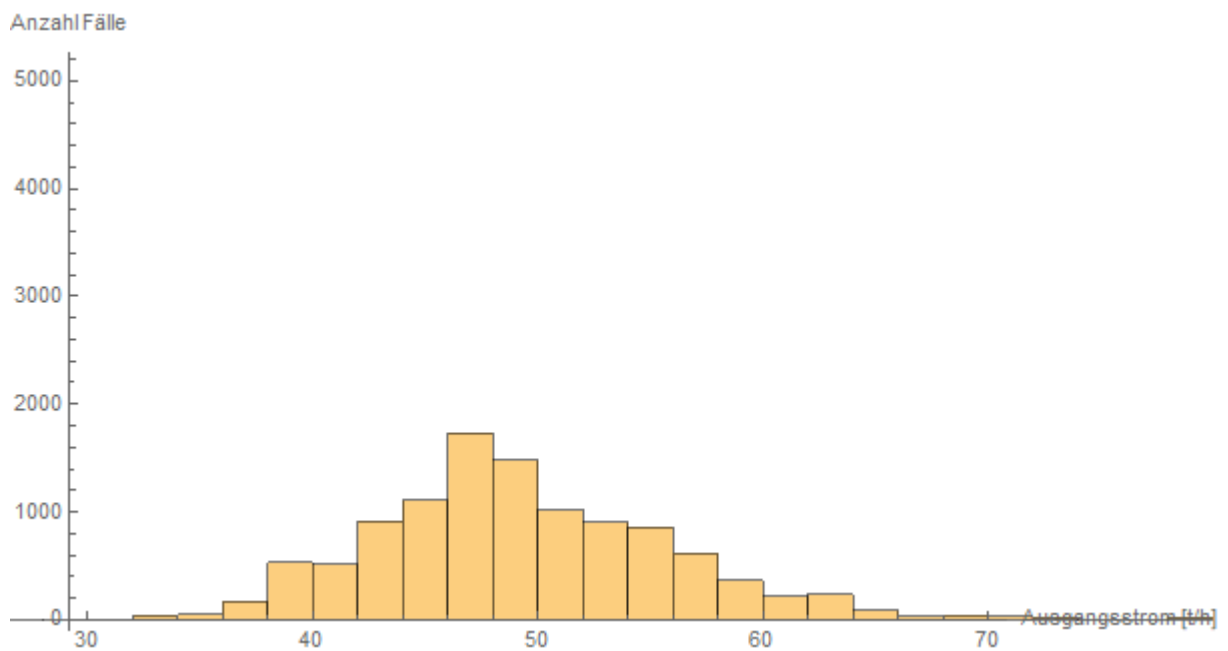


Abb. 5-7: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 1h-Werten

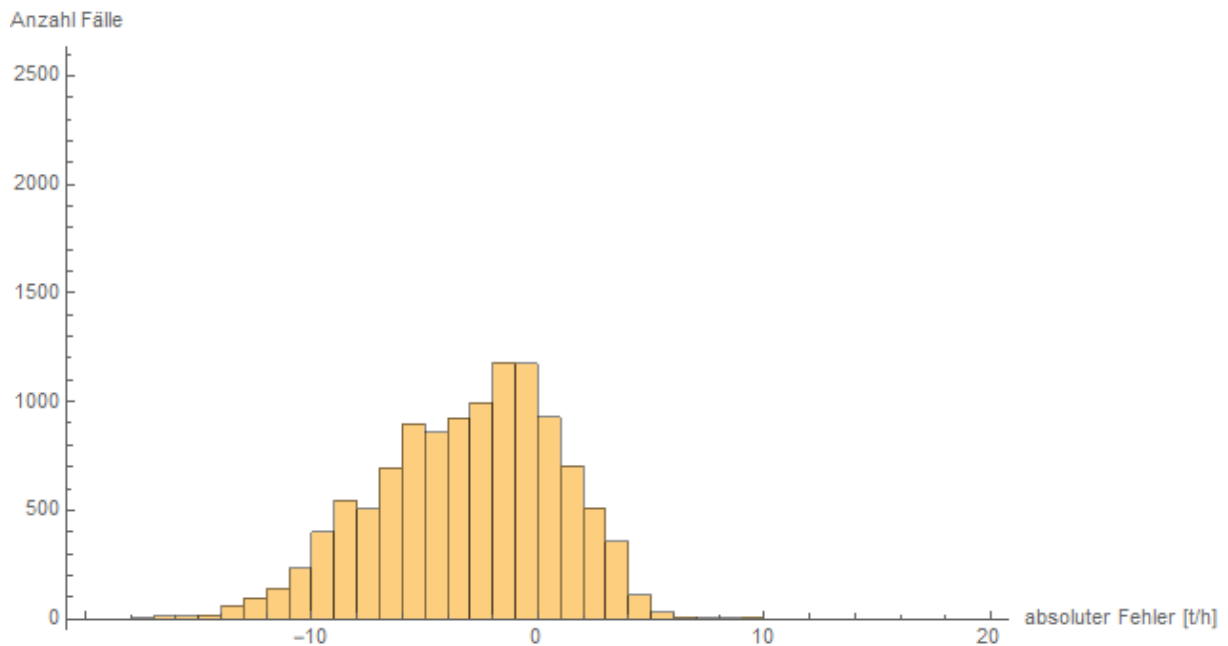


Abb. 5-8: Histogramm der absoluten Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 12min-Werten

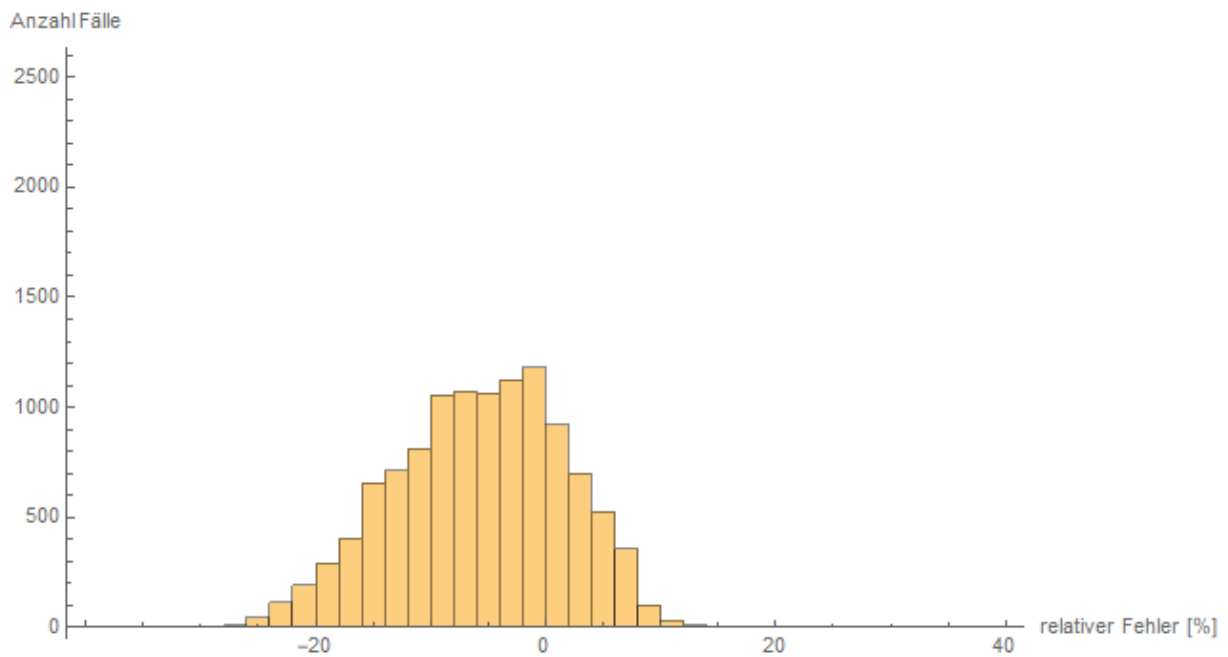


Abb. 5-9: Histogramm der relativen Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 12min-Werten



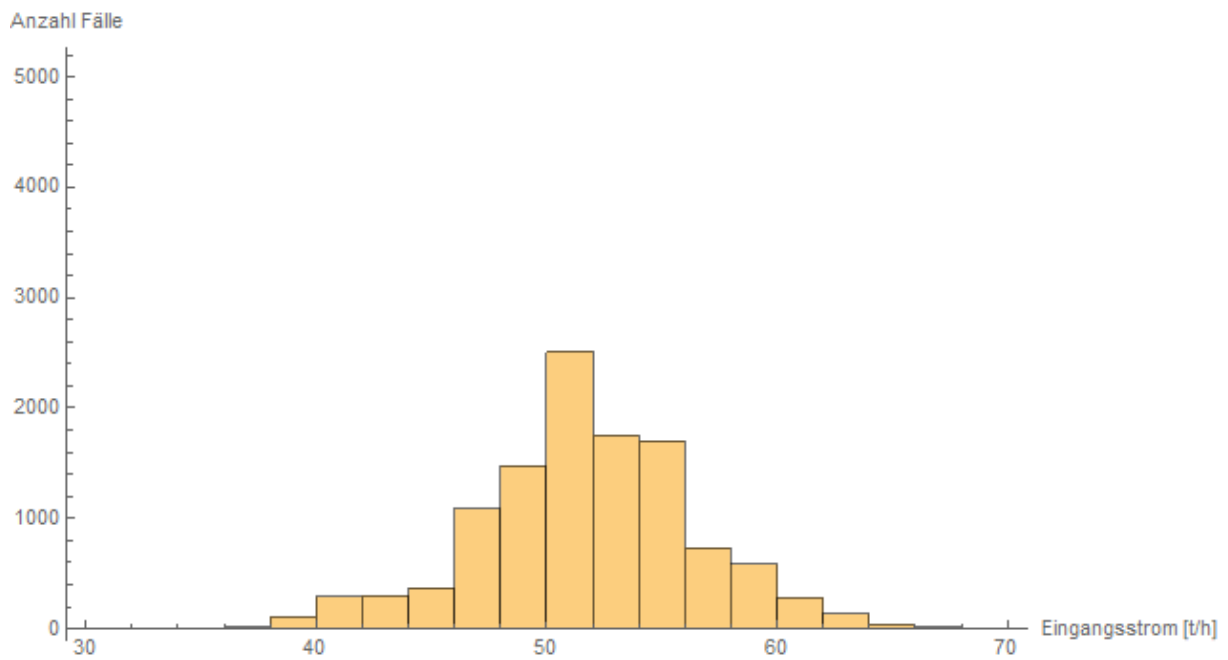


Abb. 5-10: Histogramm der Summe aller Eingangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 12min-Werten

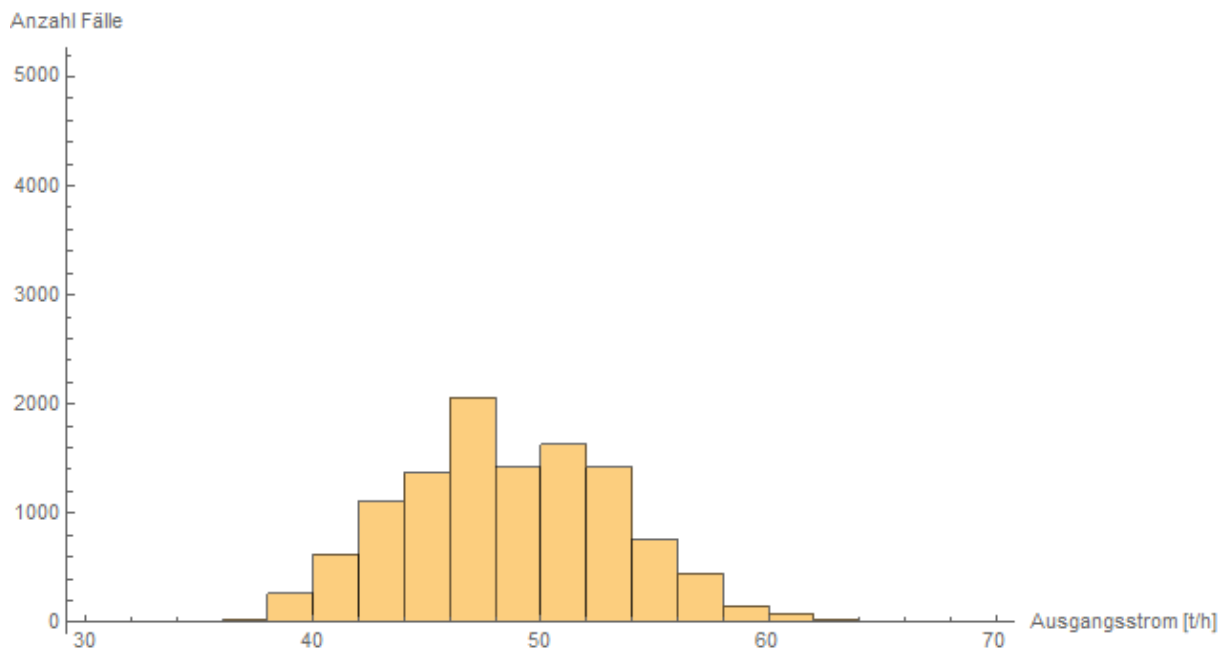


Abb. 5-11: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 12min-Werten

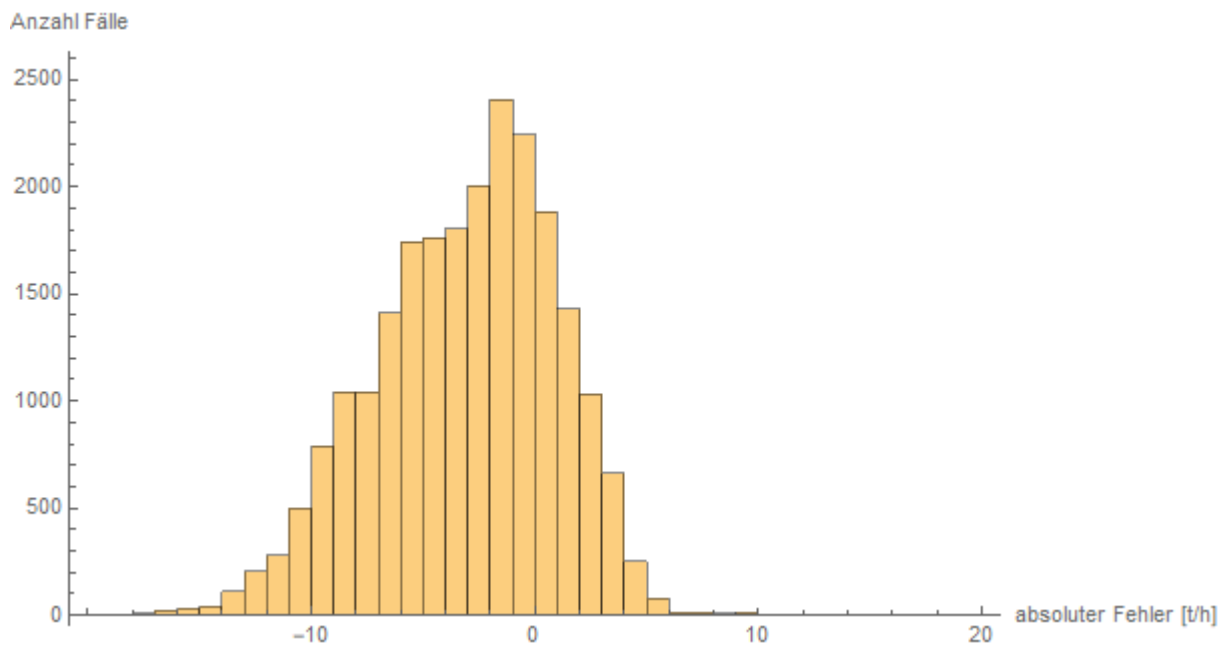


Abb. 5-12: Histogramm der absoluten Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 6min-Werten

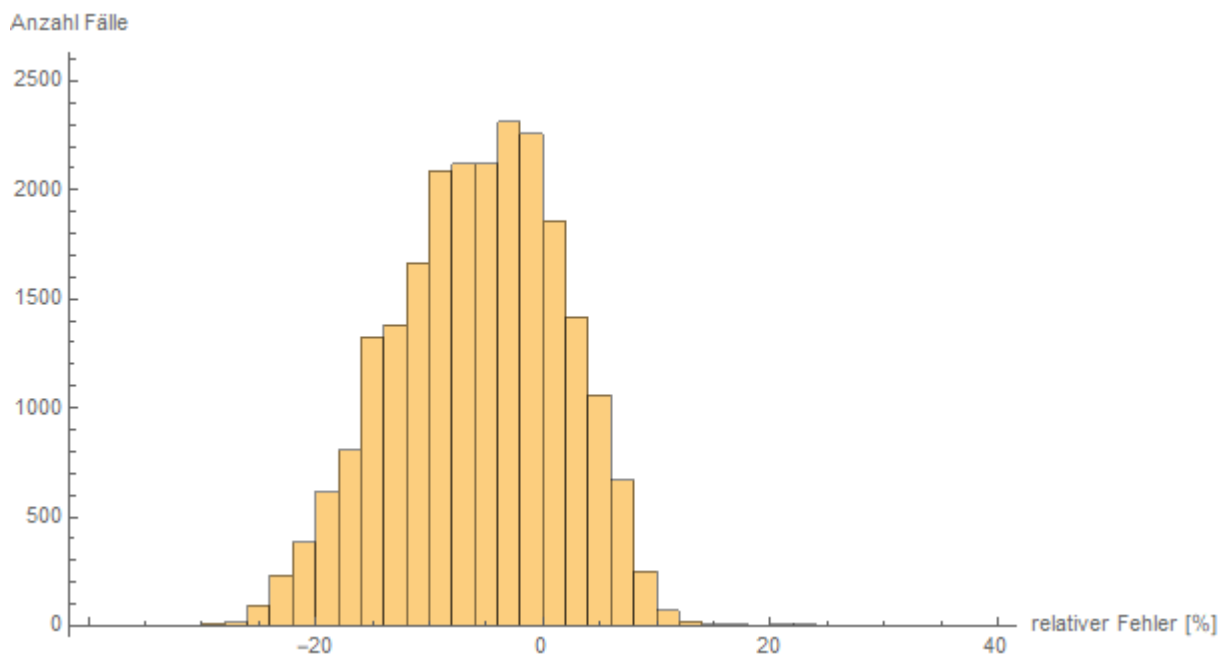


Abb. 5-13: Histogramm der relativen Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 6min-Werten

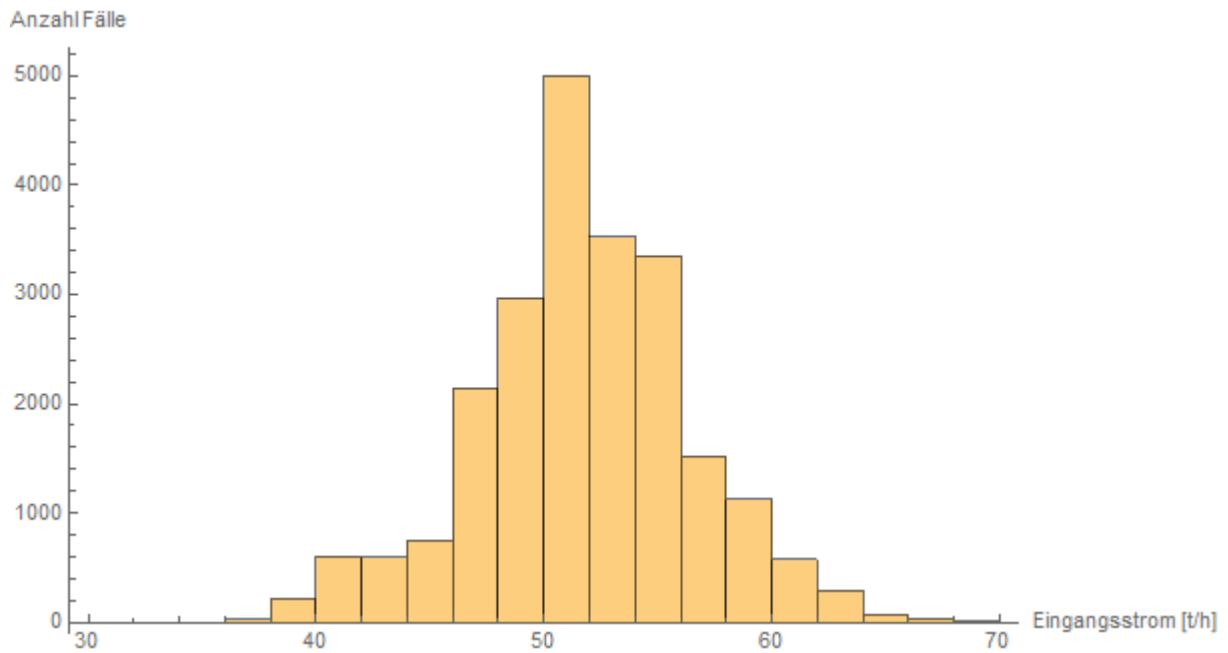


Abb. 5-14: Histogramm der Summe aller Eingangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 6min-Werten

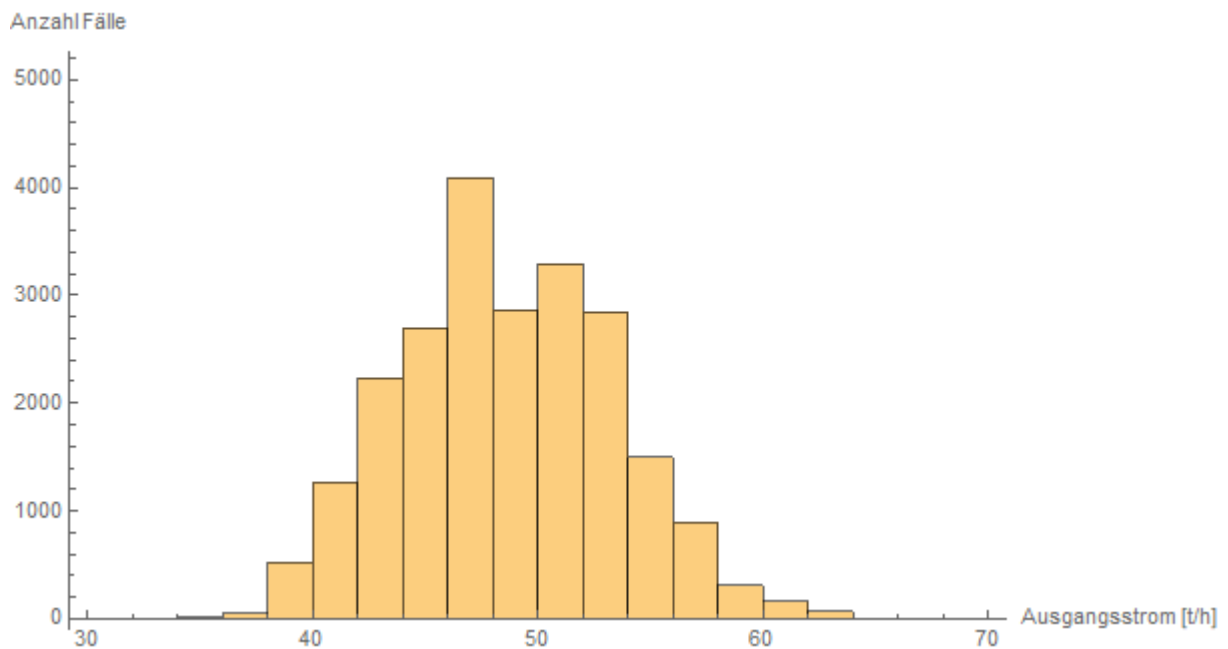


Abb. 5-15: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 6min-Werten

## 5.2 Modellierung und Validierung

In Abb. 7-34 ist das Ergebnis der ABC-Analyse für den 28.04.2014, 14:00 grafisch dargestellt. In Tab. 7-7 zeigt sich die entsprechende tabellarische Auflistung. Im Sinne einer ABC-Analyse wurde für Gruppe A und Gruppe C eine obere Schranke festgesetzt und die Anlagen zusammengefasst, wobei die Anlagen der Gruppe A hohe Priorität, Anlagen der Gruppe B mittelmäßige Priorität und Anlagen der Gruppe C niedrige Priorität besitzen. Die Zusammenfassung dieser Anlagen für den 28.04.2014, 14:00 ist in Tab. 7-8 aufgelistet. Aus der ABC-Analyse erkennt man, dass die größten Mischgasverbraucher dieser Betriebsstunde Anlage 7, 25, 16 und 17 sind und nahezu 70 % des gesamten Mischgases beziehen.

Im eingeschwungenen Zustand ergeben sich folgende Massenströme, welche in Tab. 5-4 dargestellt sind und mit den gemessenen Massenströmen zu diesem Zeitpunkt verglichen werden. Strom 9 ist etwas niedriger als der gemessene Massenstrom. Hingegen ist Strom 12 aus der Simulation um etwa 7500 kg/h höher als der gemessene.

Beim Vergleich von Strom 53 und 54, welche der Anlage 12 zugeführt werden, sieht man, dass es auch hier zu erheblichen Abweichungen kommt. Die Summe der Ströme 53 und 54 entspricht ungefähr 75 % der gemessenen Ströme. Der Grund sind die Coldboxen 1 und 2, da in der Simulation die Temperaturen der Ströme auf Basis der Aufzeichnungen in der Vergangenheit gemittelt und festgelegt wurden. Es kann aber durchaus zu erheblichen Abweichungen der Temperaturniveaus zwischen den verschiedenen Betriebsstunden kommen, die sich dementsprechend auf die Trennleistung und ferner auf die resultierenden Massenströme auswirken.

Bei der Betrachtung der Ströme 67, 68 und 69 zeigt sich, dass die Summe der Massenströme um etwa 6000 kg/h höher liegt. Der Grund dafür sind die erhöhten Ströme 9 und 12 in der Simulation.

	simuliert [t/h]	gemessen [t/h]
Strom 9, Messstelle 9	2059	2799
Strom 12, Messstelle 12	17440	9924
Strom 53, Messstelle 53	6521	3455
Strom 54, Messstelle 54	3501	9602
Strom 67, Messstelle 67	13012	14742
Strom 68, Messstelle 68	3123	0
Strom 69, Messstelle 69	19682	14514

Tab. 5-4: Gegenüberstellung der simulierten Massenströme zu den gemessenen Massenströmen am 28.04.2014 (14:00)

	Hauptströme	Gesamtbilanz
Eingangsströme [kg/h]	65548	121606
Ausgangsströme [kg/h]	50287	121459
absoluter Fehler [kg/h]	-15261	-148
relativer Fehler [%]	-23,28	-0,12

Tab. 5-5: Bilanzierungsergebnisse aus dem Spreadsheet für den 28.04.2014 (14:00)

In Tab. 5-5 sind die Bilanzierungsergebnisse aus der Simulation aufgelistet. Der absolute und relative Fehler wird im Spreadsheet analog wie in der Bilanzierung in Mathematica nach (3-1) und (3-2) berechnet. Der relativ hohe Fehler der Bilanz der Hauptströme ergibt sich daraus, dass beim Sicherheitsventil in Anlage 3 etwas mehr als 9000 kg/h Restgas abgelassen werden, um das Druckniveau konstant auf 21,00 bar halten zu können. Die an den Sicherheitsventilen abgelassenen Restgasströme werden jedoch nicht in der Hauptbilanz berücksichtigt. Trotz des Ablassens des Überschusses am Sicherheitsventil in Anlage 3 ist es notwendig, Erdgas zu den Mischgasschienen zuzuführen, um dort das Druckniveau aufrecht zu erhalten. Der vergleichsweise niedrige Fehler der Gesamtbilanz zeigt, dass das Modell in sich eine hohe Konsistenz aufweist.

	Massenstrom [kg/h]	T [°C]	p [bar]
MG1-Schiene	19043	48,0	4,00
MG2-Schiene	19485	78,5	4,00
Strom 53	6521	69,7	0,60
Strom 54	3501	56,1	6,79
Strom 9	2059	37,6	4,36
Strom 12	17440	64,5	45,65

Tab. 5-6: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell vom 28.04.2014 (14:00)

In Tab. 5-6 sind die Massenströme, die Temperaturen und die Drücke einiger ausgewählter Ströme aufgelistet und werden im Folgenden zum Vergleich mit dem sich in den Case Studies einstellenden Strömen herangezogen. Die Ströme MG1-Schiene und MG2-Schiene werden zum Vergleich verwendet, da sie nach der Mischung mit dem Erdgas den Ursprung des Heizgases darstellen. Die restlichen Ströme werden in den Vergleich aufgenommen, da sie sich aus der Simulation ergeben. Hauptaugenmerk wird auf die Massenströme gelegt.

In Tab. 7-11 sind die Zusammensetzungen der Ströme in den Mischgasschienen 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 aus Anlage 2 und Anlage 3 dargestellt. Der Strom in Mischgasschiene 2 besteht mit ca. 86 gew.-% zum Großteil aus Methan. Das liegt daran, dass der Strom in Mischgasschiene 2 hauptsächlich durch den Erdgasstrom zur Mischgasschiene 2 gebildet wird. Der Strom in Mischgasschiene 1 besteht im Wesentlichen aus Wasserstoff, Methan, Ethan und Propan. Im Anhang sind auch die Zusammensetzungen der Feedströme, sowie der C1-Minus und C2-Plusströme der Entmethaner von Anlage 2 (siehe Tab. 7-12) und Anlage 3 (siehe Tab. 7-13) aufgelistet.

## 5.3 Case Studies

### 5.3.1 Absorption von Propan in Kolonne 1

Die Aufgabe von Anlage 1 ist, schwere Gasfraktionen aus dem Restgas, welche der Kolonne 1 zugeführt werden, mit Mittelbenzin herauszuwaschen. Als grenzwertige Verbindung, welche noch herausgelöst werden kann, erscheint das Propan. Dementsprechend wurden die Zusammensetzungen des gewaschenen Restgases bei variabler Mittelbenzinzufuhr simuliert und über den Propangehalt miteinander verglichen.

In einer statischen Simulation der Waschkolonne 1 wurde die Menge an Mittelbenzin variiert und der Propangehalt im gewaschenen Restgas miteinander verglichen. Bei 0 t/h Mittelbenzin wurde der Propangehalt des ungewaschenen Restgases als Referenz genommen.

Abb. 5-16 zeigt die statische Simulation der Kolonne als Screenshot. Das Mittelbenzin wird bei 20 °C und 4,99 bar in die Kolonne D9450 gespeist.

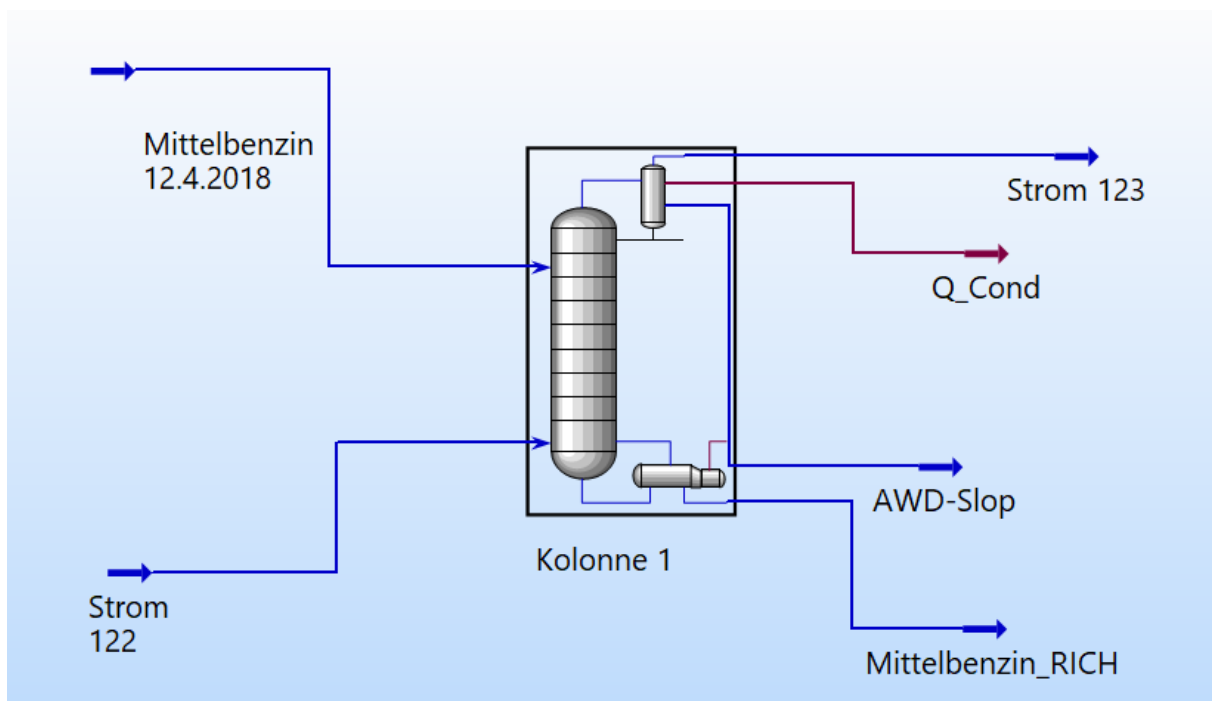


Abb. 5-16: statische Simulation der Waschkolonne 1 zur Analyse des Absorptionsverhaltens von Propan bei variablen Mittelbenzinzufuhr

In Abb. 5-17 ist der sich ergebende Propangehalt im gewaschenen Restgas in Abhängigkeit vom Einsatz des Mittelbenzins dargestellt. Paradoxe Weise steigt der Propangehalt im gewaschenen Restgas mit einem steigenden Mittelbenzineinsatz. Erst ab 35 t/h Mittelbenzin beginnt der Propangehalt im gewaschenen Restgas zu sinken. Das liegt daran, dass sich aus dem Restgas auch schwerere Komponenten als Propan ins Mittelbenzin lösen und sich deswegen die Konzentrationen verschieben.

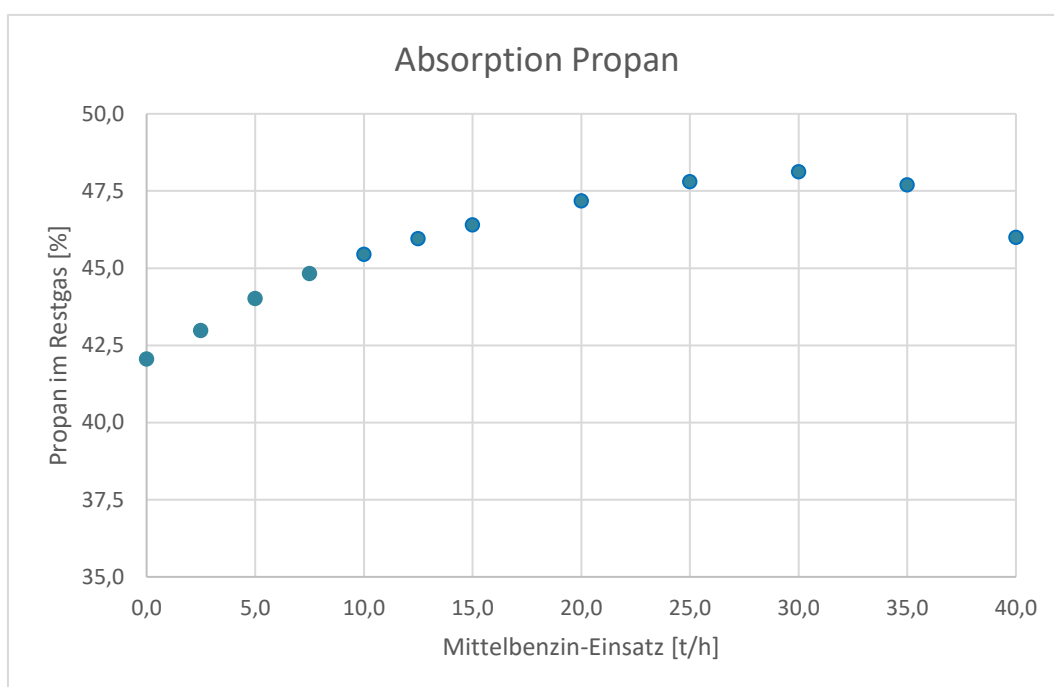


Abb. 5-17: Propangehalt im gewaschenen Restgas in Abhängigkeit von der eingesetzten Menge an Mittelbenzin

Aus diesem Grund wurde ein Graph erstellt, der in Abhängigkeit vom eingesetzten Mittelbenzin den Massenstrom von reinem Propan im gewaschenen Restgas zeigt (siehe Abb. 5-18). Hier zeigt sich, dass mit steigendem Mittelbenzineinsatz der Massenstrom an Propan im gewaschenen Restgas linear abnimmt. Für die betrachtete Betriebsstunde 28.04.2014 (14:00) sieht man, dass mit etwas mehr als 30 t/h Mittelbenzin ungefähr 1500 kg/h Propan aus dem Restgas ausgewaschen werden.



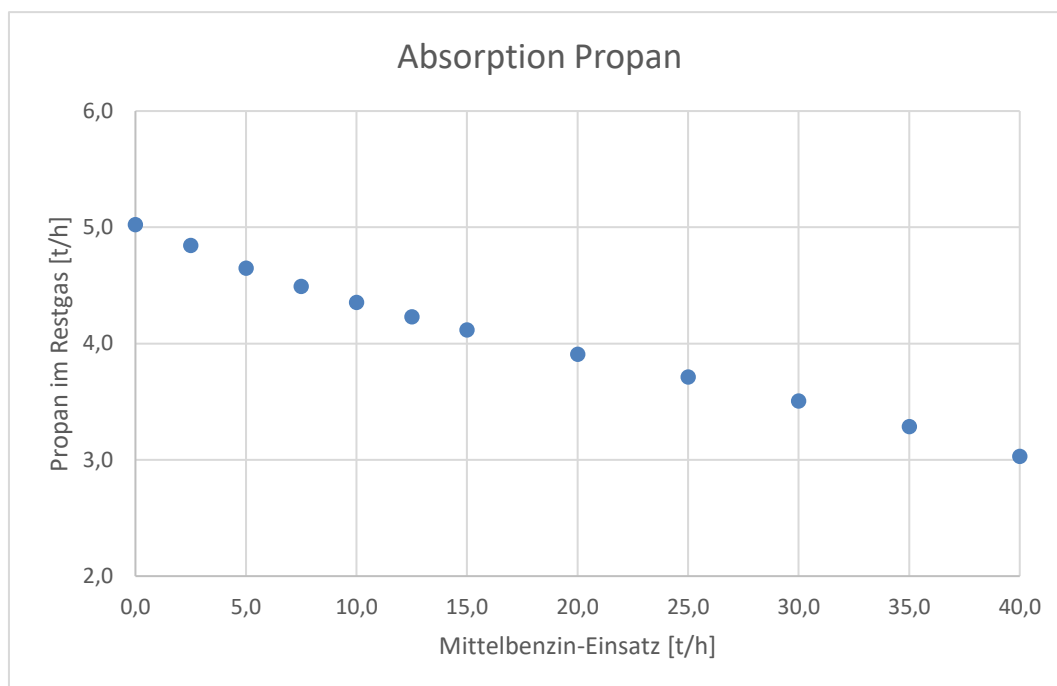


Abb. 5-18: Massenstrom von Propan im gewaschenen Restgas in Abhängigkeit von der eingesetzten Menge an Mittelbenzin

Das zu reinigende Restgas besitzt in diesem speziellen Fall einen Massenstrom von 11941 kg/h, eine Temperatur von 42,2 °C und einen Druck 4,81 bar. In Tab. 7-14 ist die Zusammensetzung des ungewaschenen Restgasstromes aufgelistet. In Tab. 7-15 sind die Werte zur Erstellung von Abb. 5-17 und Abb. 5-18 angegeben.

In Tab. 7-16 sind die Massenströme der reinen Komponenten des gewaschenen Restgases aufgelistet. Für die betrachtete Betriebsstunde 28.04.2014 (14:00) lässt sich daraus ableiten, dass sich neben dem Propan ca. 1300 kg/h i-Butan und etwa 1800 kg/h n-Butan ins Mittelbenzin lösen. Ferner wurden mit den Massenströmen der reinen Komponenten aus Tab. 7-16 die Ausbeuten ausgewählter Substanzen berechnet und in Abb. 5-19 grafisch dargestellt. Es lässt sich gut erkennen, dass sich die schwereren Kohlenwasserstoffe wie Propan, i-Buten und die Isomere von Butan besser ins Mittelbenzin lösen als die leichteren Kohlenwasserstoffe wie Methan, Ethan und Ethylen. Bei einem Einsatz von ca. 30 t/h wie in der Betriebsstunde 28.04.2014 (14:00) ergibt sich eine Propanausbeute von etwas weniger als 40 %. Weiters lassen sich ca. 95 % n-Butan, ca 90% i-Buten und ca. 82 % i-Butan aus dem

Restgas auswaschen. Bei einer Steigerung des Mittelbenzin-Einsatzes auf 40 t/h könnten 50 % des Propanes aus dem Gasstrom gewonnen werden.

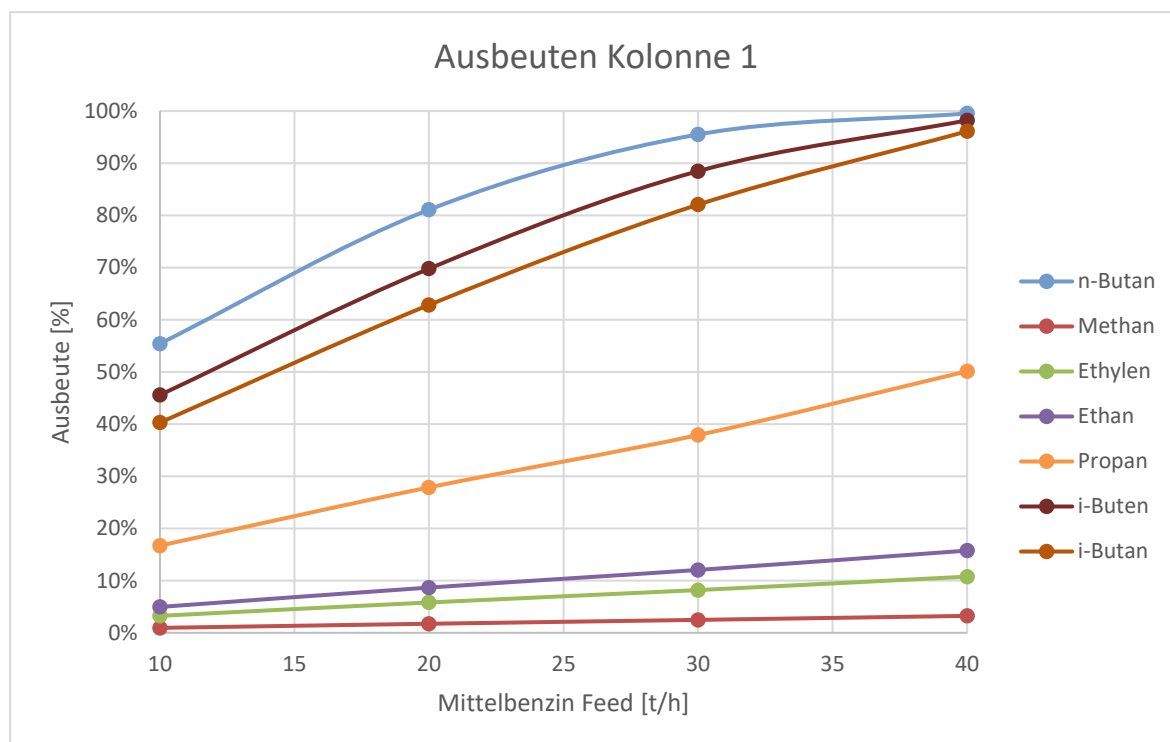


Abb. 5-19: Ausbeuten ausgewählter Substanzen in Kolonne 1

Die Werte zur Erstellung von Abb. 5-19 sind in Tab. 7-17 aufgelistet.

### 5.3.2 Optimierte Ströme 16, 17, 21 und 22 – Szenario 2

In der Arbeit von Tomaschitz [10] wurden für die gleiche Raffinerie Case Studies durchgeführt und der Brennstoffverbrauch der Anlage 16, 17, 21 und 21 optimiert. Die Werte des optimierten Mischgasverbrauches wurden übernommen und auf das Rest- und Mischgassystem angewendet.

Da die Werte aus der Arbeit von Tomaschitz im Gegensatz zum Rest – und Mischgassystem bereits für die gesamten Anlagen 16,17, 21 und 21 gelten, werden die Werte gleichmäßig auf die Ströme „Strom 56“, „Strom 57“, „Strom 58“ und „Strom 59“ aufgeteilt.

In Tab. 5-7 sind die Bilanzierungsergebnisse aus dem Modell aufgelistet. Im Vergleich mit der Bilanzierung vom 28.04.2014 (14:00) (Tab. 5-5) sind die Ein- und Ausgangsströme ungefähr um 1800 kg/h gestiegen. Der Grund dafür ist, dass der opti-

mierte Mischgasverbrauch um 1800 kg/h höher liegt als der Verbrauch, der an der gewählten Betriebsstunde gemessen wurde.

	Hauptströme	Gesamtbilanz
Eingangsströme [kg/h]	67314	123372
Ausgangsströme [kg/h]	52063	123234
absoluter Fehler [kg/h]	-15251	-138
relativer Fehler [%]	-22,66	-0,11

Tab. 5-7: Bilanzierungsergebnisse aus dem Spreadsheet für die optimierten Ströme 16, 17, 21 und 22, Szenario 2

Bei den Zusammensetzungen (Tab. 7-11 und Tab. 7-18) zeigt sich, dass der Wasserstoffgehalt in beiden Mischgasschienen ungefähr gleich bleibt. Der Methangehalt erhöht sich in der Mischgasschiene 1 auf ca. 28 gew.-%, während in der Mischgasschiene 2 der Gehalt annähernd konstant bleibt. In der Mischgasschiene 1 nimmt der Propangehalt mit 1 gew.-% leicht ab.

	Massenstrom [kg/h]	T [°C]	p [bar]
MG1-Schiene	20492	47,6	4,00
MG2-Schiene	19810	76,8	4,00
Strom 53	6521	69,7	0,60
Strom 54	3501	56,1	6,79
Strom 9	3495	37,6	4,36
Strom 12	17766	64,5	45,65

Tab. 5-8: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell der optimierten Ströme 16, 17, 21 und 22, Szenario 2

Der Vergleich der ausgewählten Ströme (Tab. 5-6 und Tab. 5-8) zeigt, dass die Massenströme der Mischgasschiene 1 und 2 sich nur schwach erhöhen. Die Temperatur in der Mischgasschiene 2 sinkt um etwa 2 °C. Strom 9 erhöht sich um fast 1500 kg/h.

### 5.3.3 Ausfall Anlage 7

Aus der ABC-Analyse (Abb. 7-34, Tab. 7-7 und Tab. 7-8) zeigt sich, dass Anlage 7 am 28.04.2014 um 14:00 die Anlage, mit dem höchsten Mischgasverbrauch war. Ferner lässt sich aus der ABC-Analyse über den durchschnittlichen Mischgasverbrauch (Abb. 7-36, Tab. 7-22 und Tab. 7-23) ableiten, dass im Schnitt Anlage 7, verglichen mit den anderen Endverbrauchern, mit viel Mischgas versorgt werden muss. Der Ausfall einer entsprechenden Anlage mit hoher Priorität wurde somit simuliert und die Auswirkungen auf das Rest- und Mischgassystem analysiert.

In diesem Szenario wurde der Mischgasverbrauch für Anlage 7 für die gewählte Betriebsstunde gleich Null gesetzt. Die Bilanz in Tab. 5-9 zeigt, dass die Summe der Ströme um ungefähr 5000 kg/h abgenommen hat.

Die Zusammensetzungen sind in Tab. 7-19 aufgelistet. Im Vergleich zur gewählten Betriebsstunde 28.04.2014, 14:00 in Tab. 7-11 fällt auf, dass die Zusammensetzung beider Mischgasschienen fast unverändert bleibt. In Mischgasschiene 2 ist der Methangehalt um 2 gew.-% gesunken.

	Hauptströme	Gesamtbilanz
Eingangsströme [kg/h]	59880	115938
Ausgangsströme [kg/h]	44626	115798
absoluter Fehler [kg/h]	-15254	-140
relativer Fehler [%]	-25,47	-0,12

Tab. 5-9: Bilanzierungsergebnis aus dem Spreadsheet für den Ausfall der Anlage 7

In Tab. 5-10 sieht man, dass auch hier der Massenstrom durch die Mischgasschiene 2 sich um ca. 5700 kg/h reduziert hat. Der Grund dafür liegt darin, dass die Mischgasschiene 2 Anlage 7 mit Heizgas versorgt und dementsprechend bei einem Ausfall weniger liefern muss. Der Massenstrom durch die Mischgasschiene 1 bleibt annähernd konstant. Weiters erhöht sich die Temperatur in Mischgasschiene 2 um 9 °C von 78,5 °C auf 87,5°C, während die Temperaturen der anderen Ströme konstant bleiben. In Tab. 5-10 lässt sich weiters erkennen, dass die Ströme 53 und 54 unverändert bleiben.

	Massenstrom [kg/h]	T [°C]	p [bar]
MG1-Schiene	19110	47,9	4,00
MG2-Schiene	13776	87,5	4,00
Strom 53	6521	69,7	0,60
Strom 54	3501	56,1	6,79
Strom 9	2126	37,6	4,36
Strom 12	11701	64,5	45,65

Tab. 5-10: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell für den Ausfall der Anlage 7

### 5.3.4 Ausfall Ströme 16, 17, 21 und 22

Wie aus den ABC-Analysen (Betriebsstunde 28.04.2014 (14:00): Abb. 7-34, Tab. 7-7 und Tab. 7-8; durchschnittlicher Mischgasverbrauch: Abb. 7-36, Tab. 7-22 und Tab. 7-23) ersichtlich stellen auch die Anlagen 16, 17, 21 und 22 vier große Mischgasverbraucher dar. Dementsprechend wurde, analog zu Szenario 5.3.3, der Ausfall dieser wesentlichen Verbraucher simuliert und das Verhalten des Rest- und Mischgassystems beobachtet.

Die Anlagen 16, 17, 21 und 22 benötigen (Abb. 7-34 und Tab. 7-7) in Summe fast 7500 kg/h Mischgas. In Tab. 5-11 sind die Bilanzergebnisse aus dem Spreadsheet dargestellt. Im Vergleich zur Betriebsstunde zeigt sich, dass sich die Summe der Ströme um etwas weniger als 7500 kg/h verringert.

	Hauptströme	Gesamtbilanz
Eingangsströme [kg/h]	58206	114264
Ausgangsströme [kg/h]	42944	114122
absoluter Fehler [kg/h]	-15262	-142
relativer Fehler [%]	-26,22	-0,12

Tab. 5-11: Bilanzierungsergebnisse aus dem Spreadsheet für den Ausfall der Ströme 16, 17, 21 und 22

Die Zusammensetzung der Ströme in den Mischgasschiene und den Strömen 53 und 54 sind in Tab. 7-20 aufgelistet. Im Vergleich zur simulierten Betriebsstunde steigt in der Mischgasschiene 1 der Wasserstoff – und Propananteil um etwa 3 gew.-%. Der Methangehalt in der Mischgasschiene 1 sinkt auf ca. 15 gew.-%. In der Mischgasschiene sinkt der Methangehalt auf ungefähr 81,5 gew.-%. Der Propangehalt in Mischgasschiene 1 steigt auf etwa 22 gew.-%.

	Massenstrom [kg/h]	T [°C]	p [bar]
MG1-Schiene	16235	49,4	4,01
MG2-Schiene	14942	51,4	4,00
Strom 53	6523	69,7	0,60
Strom 54	3501	56,1	6,79
Strom 9	0	37,6	4,36
Strom 12	12153	64,5	45,65

Tab. 5-12: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell für den Ausfall der Ströme 16, 17, 21 und 22

Tab. 5-12 zeigt, dass in der Mischgasschiene 1 der Massenstrom um etwa 2800 kg/h und in der Mischgasschiene 2 um etwa 4500 kg/h sinkt. In der Schiene 1 erhöht sich die Temperatur um ca. 2 °C, während sich in der Mischgasschiene 2 die Temperatur um 27°C reduziert. Der Strom 53 liefert um ca. 2 kg/h mehr, während Strom 54 konstant bleibt. Die Zusammensetzung der Ströme 53 und 54 bleibt annähernd unverändert. Bei der Betrachtung der Ströme 9 und 12 zeigt sich, dass der Strom 9 zu Mischgasschiene 1 Null ist. Zur Mischgasschiene 2 werden im Vergleich zur Betriebsstunde 28.04.2014 (14:00) um fast 5300 kg/h weniger von Strom 12 gefördert.

### 5.3.5 Methanolreaktor

Bei der Betrachtung der jeweiligen C1-Minus Ströme zeigt sich mit etwa 10 bis 15 gew.-% ein relativ hoher Wasserstoffgehalt (Tab. 7-12 und Tab. 7-13). Die Idee ist, dass nach (5-1) der Wasserstoff mit Kohlendioxid zu Methanol und Wasser reagieren soll.



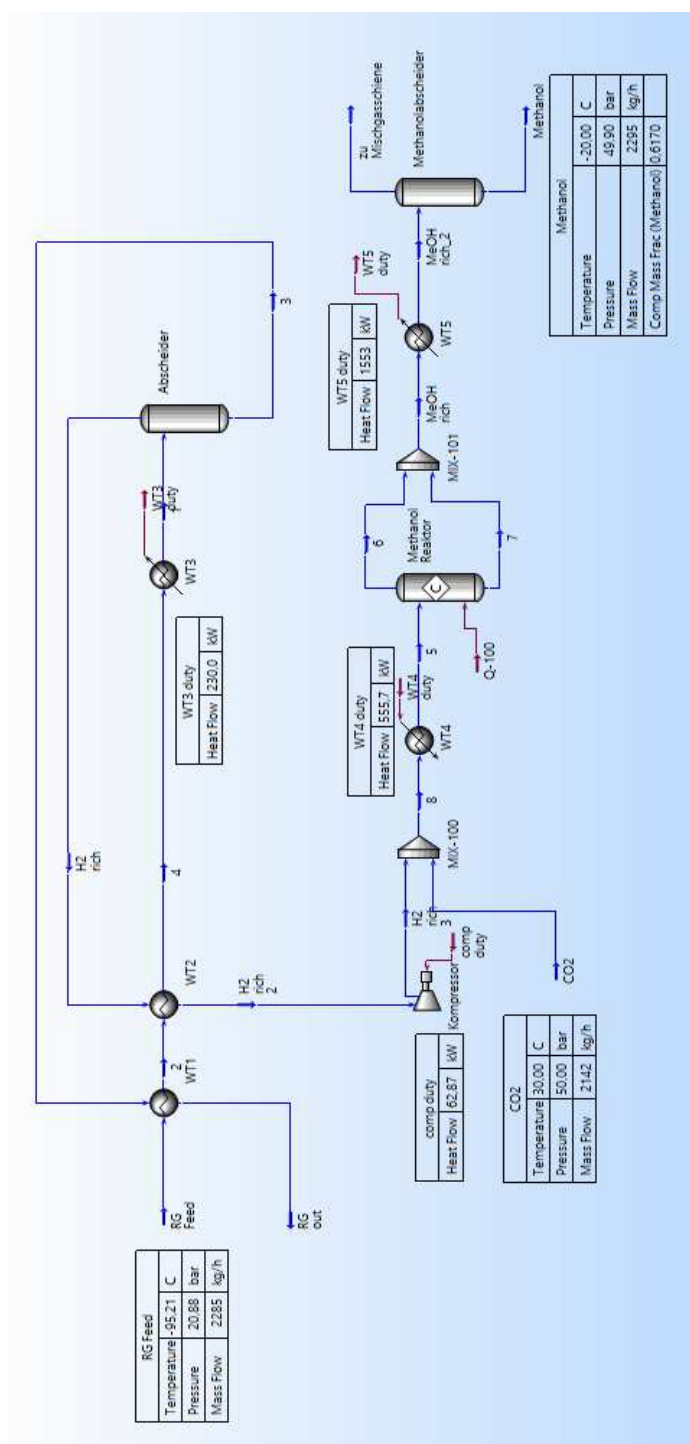


Abb. 5-20: Screenshot der statischen Simulation des Methanolreaktors.

Da die Ströme nach der Coldbox ein relativ niedriges Temperaturniveau besitzen wurde ein statischer Prozess in PetroSIM generiert (Abb. 5-20). Der C1-Minus Strom von Anlage 3 und der wasserstoffreiche Feedstrom, bevor er geflasht wird (Druckniveau ca. 21 bar), werden gemischt, mit 2 Wärmeübertragern vorgekühlt und im Wärmeübertrager WT3 auf etwa -165 °C abgekühlt. Dadurch kann der sich kondensierende Anteil vom gasförmigen, mit Wasserstoff angereicherten, Strom abgetrennt werden. Die getrennten Ströme werden als Wärmekopplung durch die Wärmeüber-

trager WT1 und WT2 rückgeführt. Der kondensierte Strom entspricht von der Zusammensetzung dem eines C2-Plus Stroms und kann demnach zur Anlage 12 weitergeleitet werden. Aufgrund der Reaktionsbedingungen wird der wasserstoffreiche Strom mit einem Kompressor auf 50 bar verdichtet und mit einem reinen, stöchiometrischen CO<sub>2</sub>-Strom gemischt. Im Wärmeübertrager WT4 folgt eine weitere Erwärmung auf 200°C bevor der Strom dem Methanolreaktor zugeführt wird. Aufgrund der exothermen Reaktion wird der Reaktor gekühlt, sodass die Temperatur von 300°C nicht überschreitet wird. Für die Methanolsynthese wird üblicherweise ein Katalysator basierend auf Kupfer, Zink und Aluminiumoxid eingesetzt, welcher in einem Temperaturbereich von 200 bis 300°C arbeitet [11]. Der Produktstrom wird im Wärmeübertrager WT5 auf -20°C abgekühlt, um das Methanol zu kondensieren.

Um eine Vergiftung des Katalysators im Methanolreaktor zu vermeiden, wäre es zweckmäßig, vor dem Prozess den Arsenreaktor zu schalten, um vorzeitig die Katalysatorgifte aus den Gasströmen zu entfernen. Für den 28.04.2014 (14:00) ergibt sich eine wässrige Methanollösung von 2295 kg/h mit einem Methanolgehalt von ca. 62 gew.-%. Das entspricht einem Massenstrom von 1423 kg/h reinem Methanol. Das so entstandene Methanol könnte beispielhaft zur Herstellung von MTBE weiterverwendet oder verkauft werden. Der entwickelte Prozess ist in Abb. 5-20 dargestellt.

### 5.3.6 Ausnahmebetrieb

Im betrachteten Zeitraum vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) wurden die maximal gemessenen Massenströme jedes Ein- und Ausgangsstromes ermittelt (Abb. 7-37, Tab. 7-24 und Tab. 7-25) und dieser Extremfall simuliert.

In Tab. 5-13 sind die Bilanzergebnisse aus dem Spreadsheet aufgelistet. Die Summe der Eingangsströme erhöht sich um 120 t/h und die Summe der Ausgangsströme erhöht sich um 94 t/h. Bei der Gesamtbilanz ergibt sich von allen betrachteten Szenarien der geringste, relative Simulationsfehler mit 0,04 %.

In Tab. 5-14 zeigt sich, dass der Massenstrom durch die Mischgasschiene 1 sich um knapp 40 t/h erhöht und sich der Massenstrom durch Mischgasschiene 2 um fast 52 t/h steig. Die Temperatur der Mischgasschiene 1 ist um 7 °C wärmer, während die Temperatur in Mischgasschiene 1 um fast 40°C kühler ist.



	Hauptströme	Gesamtbilanz
Eingangsströme [kg/h]	186212	249499
Ausgangsströme [kg/h]	144500	249603
absoluter Fehler [kg/h]	-41713	105
relativer Fehler [%]	-22,40	0,04

Tab. 5-13: Bilanzierungsergebnisse aus dem Spreadsheet für den Ausnahmebetrieb

Der Massenstrom von Strom 53 aus der Anlage 2 nimmt um fast 1200 kg/h zu, während die Temperatur um knapp 10°C abnimmt. Der Massenstrom von Strom 54 aus der Anlage 3 nimmt um 200 kg/h zu. Die Temperatur nimmt um 4 °C ab. Der Strom 12 zu Mischgasschiene 2 steigt um 5000 kg/h. Außerdem werden noch 172 kg/h Erdgas zur Mischgasschiene 1 gefördert. Die Zusammensetzungen einiger ausgewählter Ströme sind in Tab. 7-21 dargestellt. Der Wasserstoffgehalt in der Mischgasschiene 1 erhöht sich um fast 18 gew.-%. Weiters pendeln sich der Methan- und Ethananteil bei etwa 15 gew.-% ein. Ein leichter Anstieg des Propenanteils ist bemerkbar. Der Propenanteil fällt auf knapp über 7 gew.-%. In der Mischgasschiene 2 sinkt der Methananteil auf etwa 83,5 gew.-% resultierend durch den hohen Erdgasstrom, der auf die Mischgasschiene aufgedrückt wird.

	Massenstrom [kg/h]	T [°C]	p [bar]
MG1-Schiene	58902	54,8	4,02
MG2-Schiene	71130	38,0	4,00
Strom 53	7654	60,5	0,60
Strom 54	3704	52,0	6,78
Strom 9	172	37,6	4,36
Strom 12	22537	64,5	45,65

Tab. 5-14: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell für den Ausnahmebetrieb

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In KBC PetroSIM wurde das Rest- und Mischgasnetzwerk einer Raffinerie dynamisch implementiert und einige Case Studies durchgeführt. Um eine optimale Bilanzgrenze festlegen zu können wurden acht Bilanzierungsszenarien festgelegt und auf Basis von Messwerten vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) eine statistische Auswertung vorgenommen. Durch die Wahl des geeignetsten Bilanzierungsszenarios haben sich die wesentlichen Ein- und Ausgangsströme ergeben und es wurde mithilfe von Verfahrensfließbildern, Rul's (Rohrleitungs- und Instrumentenfließschemas) und dem Prozessleitbild das Rest- und Mischgassystem in KBC PetroSIM implementiert. In dem betrachteten Zeitraum wurde eine Betriebsstunde gesucht, bei der möglichst alle Anlagen in Betrieb waren. Die Wahl fiel auf den 28.04.2014 (14:00). In Wolfram Mathematica wurde eine Schnittstelle aus der Arbeit von Tausendschön [7] adaptiert, um in Wolfram Mathematica die Datenverwaltung durchführen zu können und im Anschluss die aufbereiteten Daten über die Schnittstelle an das Modell zu übergeben und die Simulationsergebnisse auszulesen.

Zuerst wurde die genannte Betriebsstunde dynamisch simuliert bis sich ein statischer Zustand eingestellt hat. Ausgehend von dieser Simulation wurden sämtliche Case Studies durchgeführt. Dazu wurde ein Ausfall der Anlage 7, sowie der Ströme 16, 17, 21 und 22 nachgestellt. Weiters wurden die Szenarien aus der Arbeit von Tomaschitz [10], in denen der Mischgasbedarf der Ströme 16, 17, 21 und 22 optimiert wurde, simuliert. Ferner wurde auch ein durchschnittlicher Betrieb, sowie ein Betrieb maximaler Auslastung des gesamten Systems simuliert. Weiters wurde für einen konstanten Restgasstrom das Lösungsverhalten von Propan in einem variablen Mittelbenzinstrom analysiert, sowie Überlegungen angestellt, in den bestehenden Prozess des Rest- und Mischgassystems einen Reaktor zur Methanolsynthese zu integrieren.

Bei der Gesamtbilanzierung hat sich für die gewählte Bilanzierungsgrenze mit einem durchschnittlichen, relativen Bilanzfehler von knapp unter 3 % für ein System dieser Größe und zum Großteil gasförmigen Strömen eine sehr genaue Bilanz ergeben. Auf Basis der Bilanz steht ein dynamisches, ganzheitliches Modell des Rest- und Mischgassystems zur Verfügung. Durch Case Studies wurde es möglich, das Verhalten des ganzen Systems grundlegend zu studieren.

Bei den Case Studies hat der Ausnahmebetrieb gezeigt, dass im Extremfall mit knapp über 60 t/h für Mischgasschiene 1 und 70 t/h für Mischgasschiene 2 der dreifache Gasdurchfluss zustande kommen kann. In Tab. 7-24 sieht man auch, dass bei den Strömen 9 und 12 zu den Mischgasschienen, sowie bei den Strömen 12, 9, 52 und 55 hohe Massenströme auftreten können.

Die Case Studies mit den optimierten Anlagen 16, 17, 21 und 22, den ausgefallenen Anlagen 16, 17, 21 und 22 und der ausgefallenen Anlage 7 zeigen, dass die Mischgasschienen relativ unabhängig voneinander die entsprechend angeschlossenen Verbraucher mit Mischgas versorgen.

Beim Vergleich der Ströme 9 und 12 zu den Mischgasschienen zeigt sich, dass die Regelung ebenfalls unabhängig voneinander das Netzwerk versorgt. So zeigt sich beim Fall der ausgefallenen Anlage 7, der von der Mischgasschiene 2 Heizgas bezieht, dass der Strom 9 zur Mischgasschiene 1 annähernd konstant bleibt und sich nur der Massenstrom von Mischgasschiene 2 in der Größenordnung der Anlage 7 reduziert. So lässt sich auch in den Case Studies der optimierten und ausgefallenen Anlagen 16, 17, 21 und 22 erkennen, dass die Ströme 9 und 12 sich in der Größenordnung wie die geänderten Mischgasbezüge der entsprechenden Verbraucher direkt ändern.

Des Weiteren erkennt man, dass die Ströme 53 und 54 der Anlage 2 und Anlage 3 so gut wie gar nicht beeinflusst werden. Erst im Ausnahmebetrieb zeichnet sich eine leichte Änderung der Ströme ab. Bei der Case Study des Propangehaltes in Abhängigkeit vom Mittelbenzin-Einsatz zeigt sich, dass für die betrachtete Betriebsstunde paradoxerweise der Propangehalt bis zu einem Einsatz von 35 t/h Mittelbenzin zunimmt. Bei Betrachtung der Massenströme des reinen Propans zeigt sich jedoch, dass das Propan aus dem Restgas mit steigendem Mittelbenzin-Einsatz linear abnimmt und für die betrachtete Betriebsstunde 28.04.2014 (14:00) ca. 1500 kg/h Propan aus dem Restgas herausgelöst werden kann. Nebenbei werden auch ungefähr 1300 kg/h i-Butan und 1800 kg/h n-Butan aus dem Restgas gewonnen.

Beir Case Study über den Methanolreaktor zeigt sich, dass es für die Betriebsstunde vom 28.04.2014 (14:00) theoretisch möglich ist, 2295 kg/h Methanol mit einem Gehalt von ca. 62 gew.-% herzustellen. Das so produzierte Methanol könnte zu MTBE verarbeitet oder verkauft werden.

Als Ausblick kann das Modell in die OptiApp von Pöllabauer [1] eingebettet werden und zur Optimierung einer Raffinerie beitragen. Das Modell könnte zusätzlich um ein Modell des Fackelgassystems erweitert werden und so ferner sicherheitskritische Szenarien simuliert werden. So könnte ein ganzheitliches Simulationstool entwickelt werden, welches auch zur Personalschulung im Umgang mit dem Rest- und Mischgasnetzwerk zum Einsatz kommen kann.

## 7 Anhang

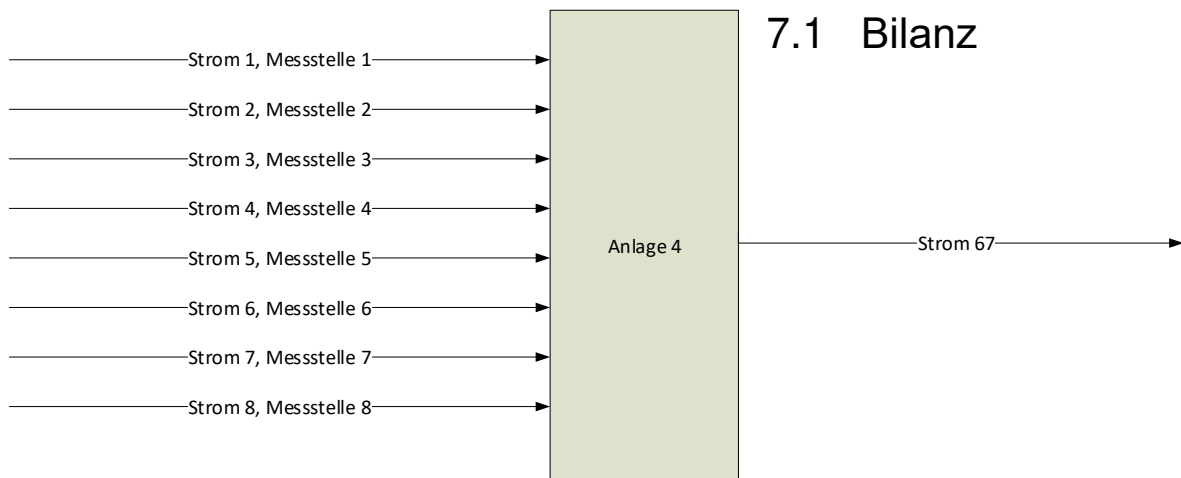


Abb. 7-1: Zusammensetzung von Strom 67

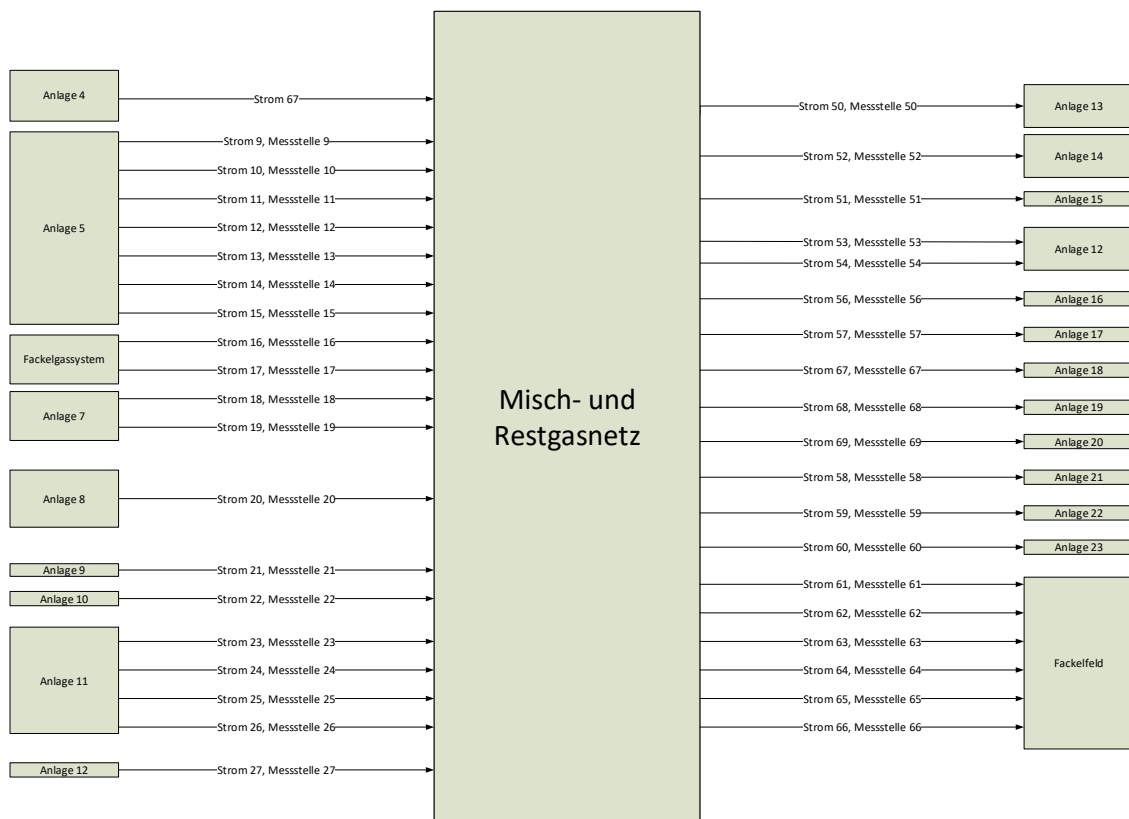


Abb. 7-2: Gesamtbilanz Szenario 1

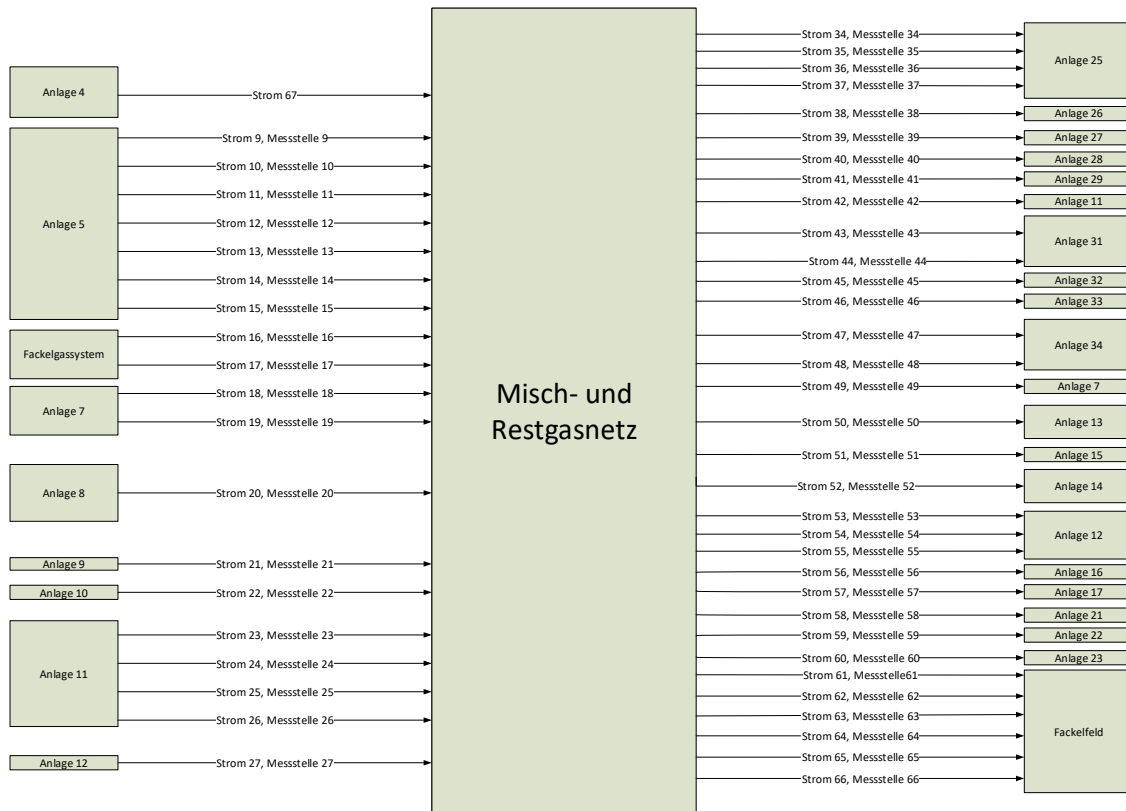


Abb. 7-3: Gesamtbilanz Szenario 2

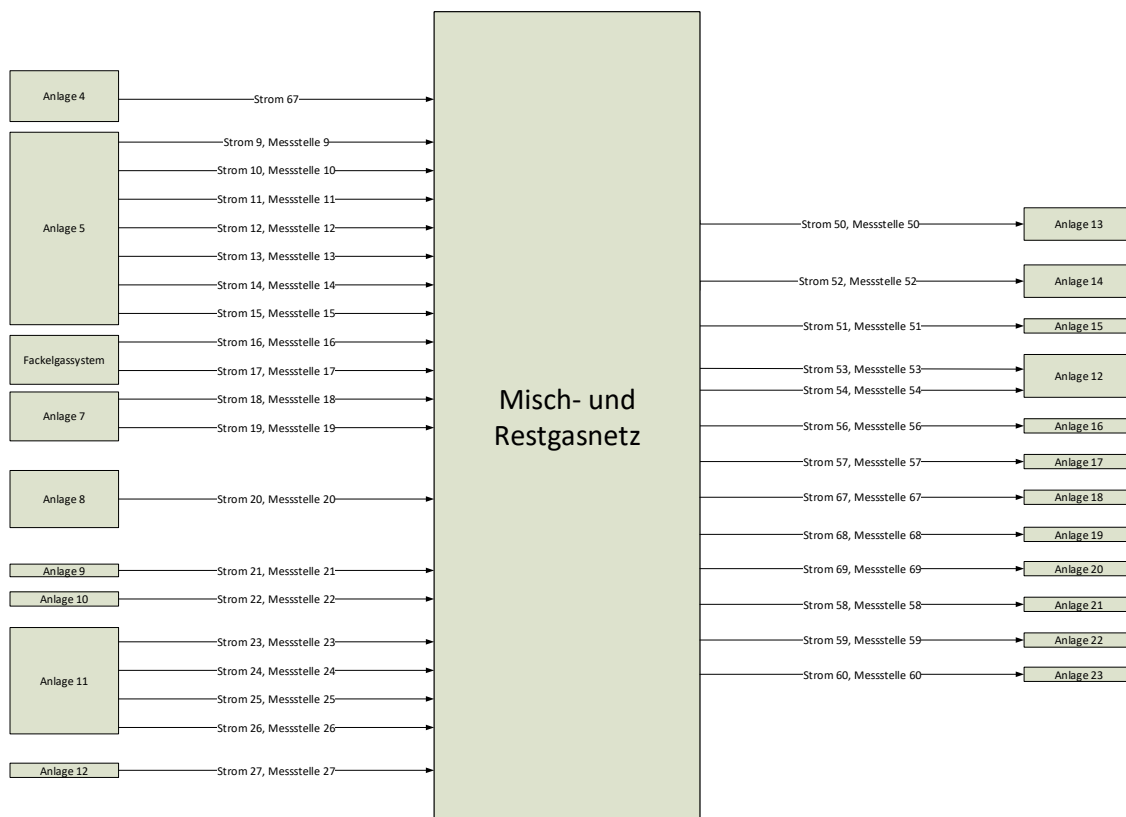


Abb. 7-4: Gesamtbilanz Szenario 3

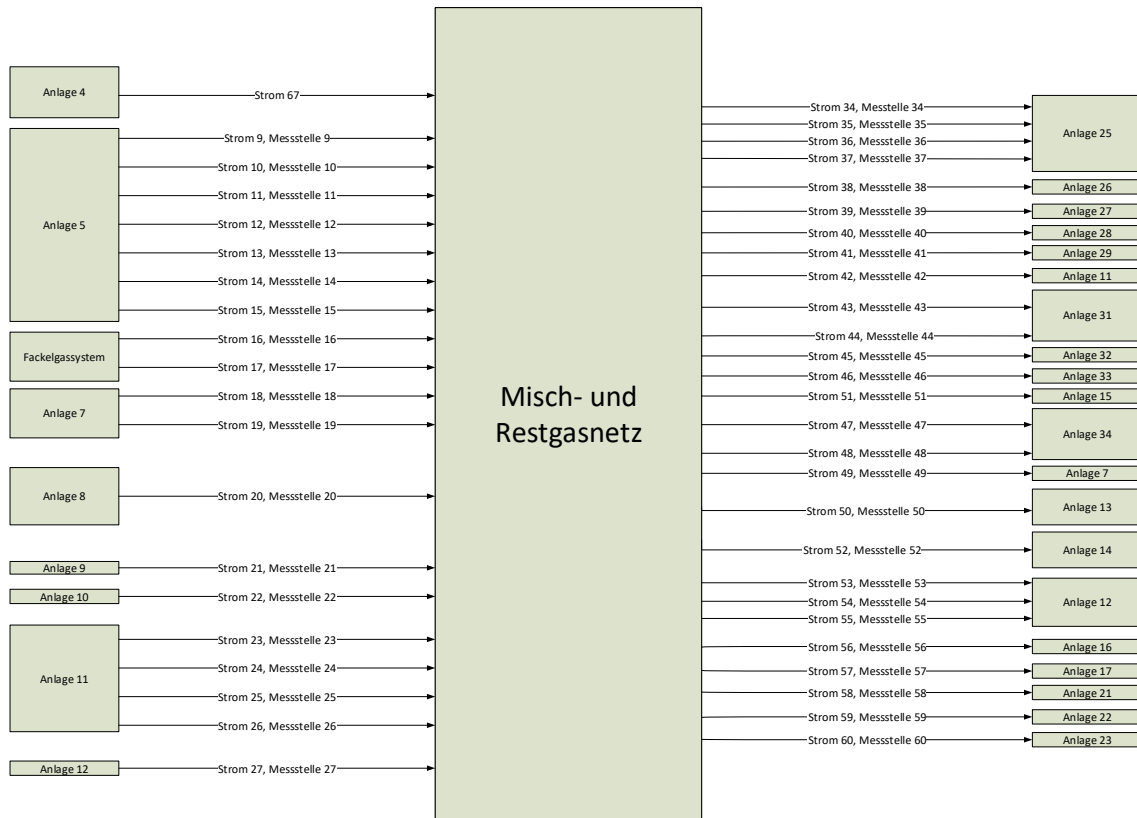


Abb. 7-5: Gesamtbilanz Szenario 4

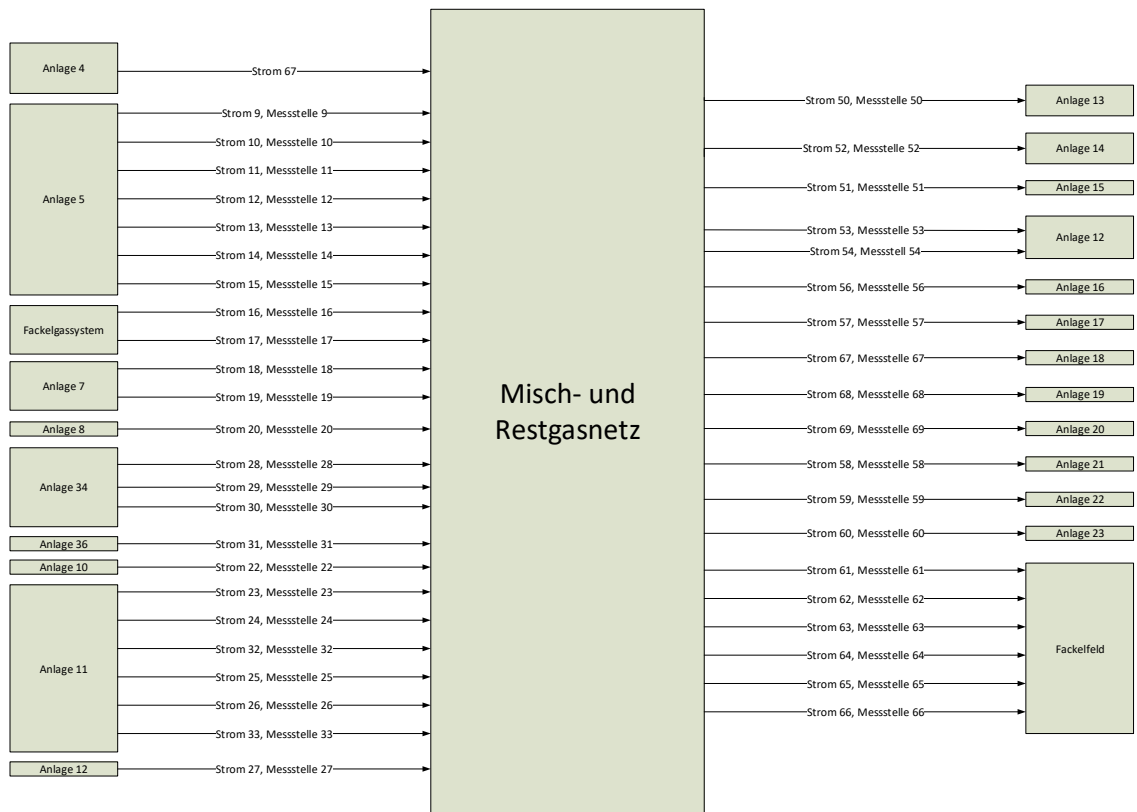


Abb. 7-6: Gesamtbilanz Szenario 5

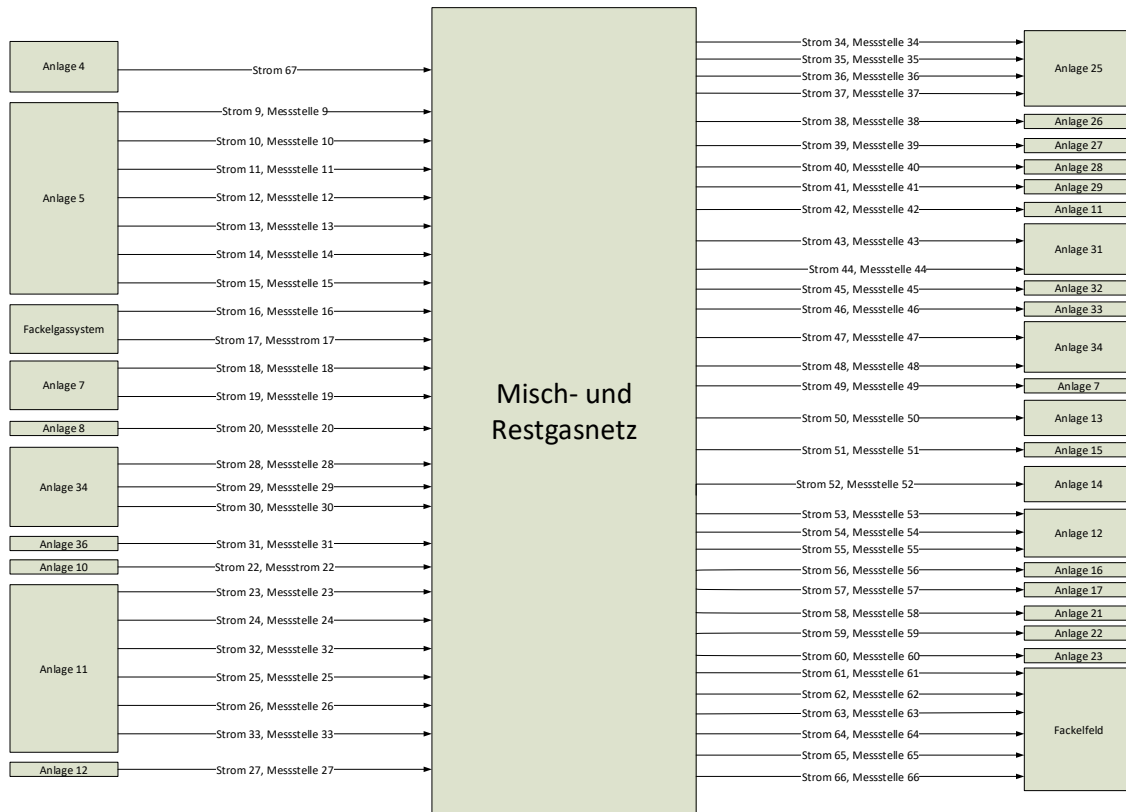


Abb. 7-7: Gesamtbilanz Szenario 6

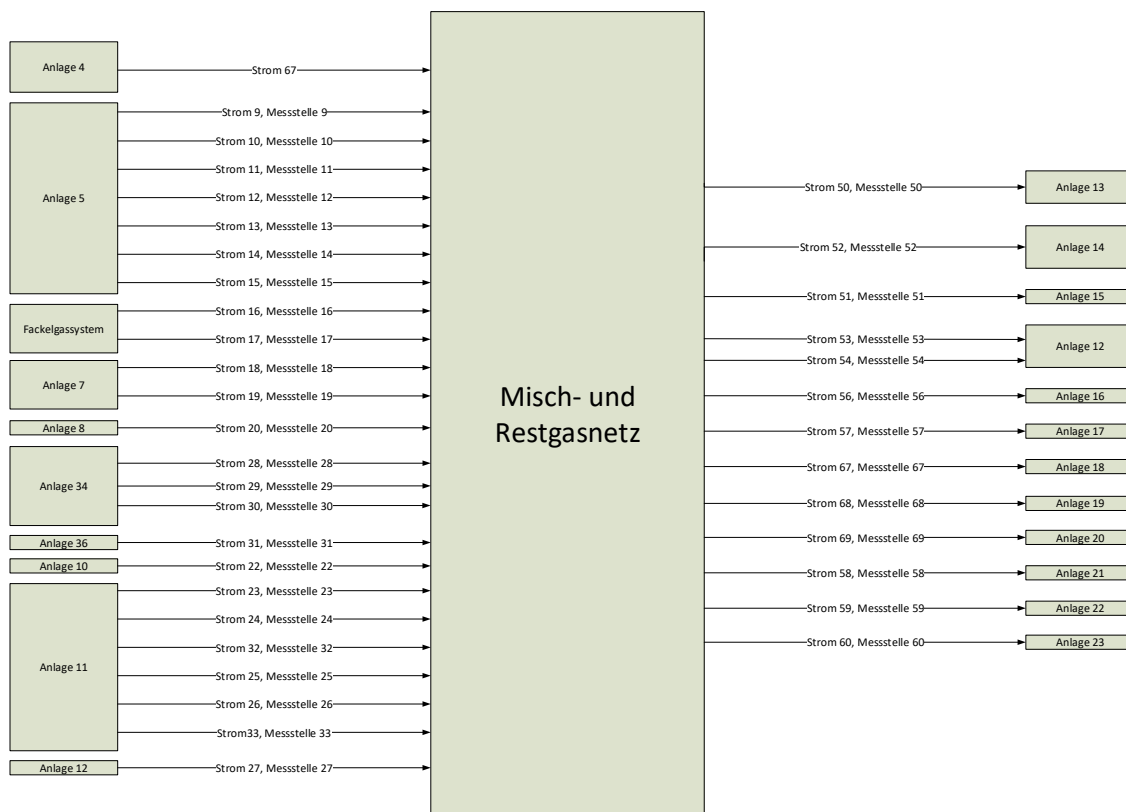


Abb. 7-8: Gesamtbilanz Szenario 7



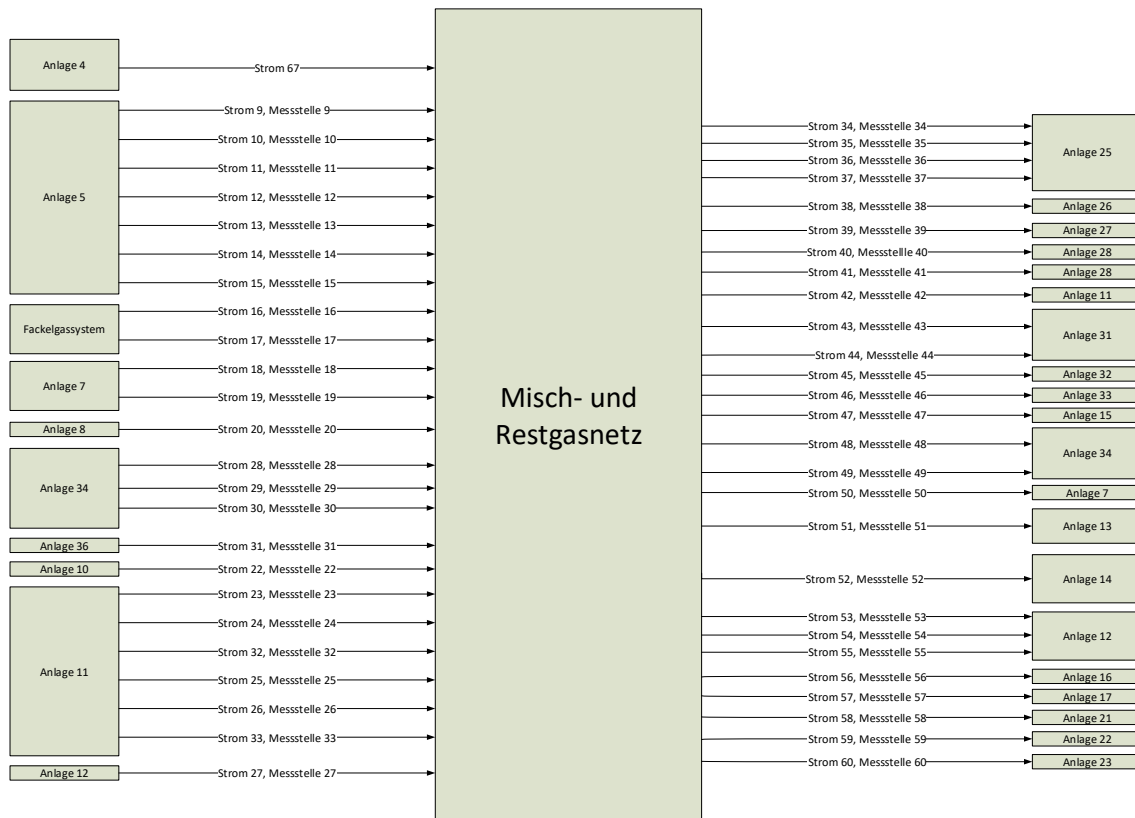


Abb. 7-9: Gesamtbilanz Szenario 8

Messstelle (tag number)	Beschreibung
Messstelle 1	Strom 1
Messstelle 2	Strom 2
Messstelle 3	Strom 3
Messstelle 4	Strom 4
Messstelle 5	Strom 5
Messstelle 6	Strom 6
Messstelle 7	Strom 7
Messstelle 8	Strom 8
Messstelle 9	Strom 9
Messstelle 10	Strom 10
Messstelle 11	Strom 11
Messstelle 12	Strom 12

---

Messstelle 13	Strom 13
Messstelle 14	Strom 14
Messstelle 15	Strom 15
Messstelle 16	Strom 16
Messstelle 17	Strom 17
Messstelle 18	Strom 18
Messstelle 19	Strom 19
Messstelle 20	Strom 20
Messstelle 21	Strom 21
Messstelle 22	Strom 22
Messstelle 23	Strom 23
Messstelle 24	Strom 24
Messstelle 25	Strom 25
Messstelle 26	Strom 26
Messstelle 27	Strom 27

---

Tab. 7-1: Tabellarische Auflistung der Eingangsströme der eigenen Bilanz. Die orange markierten Messtellen werden im Modell als „Strom 67“ zusammengefasst

---

Messstelle (tag number)	Beschreibung
Messstelle 1	Strom 1
Messstelle 2	Strom 2
Messstelle 3	Strom 3
Messstelle 4	Strom 4
Messstelle 5	Strom 5
Messstelle 6	Strom 6
Messstelle 7	Strom 7
Messstelle 8	Strom 8
Messstelle 9	Strom 9
Messstelle 10	Strom 10
Messstelle 11	Strom 11
Messstelle 12	Strom 12
Messstelle 13	Strom 13
Messstelle 14	Strom 14
Messstelle 15	Strom 15
Messstelle 16	Strom 16
Messstelle 17	Strom 17
Messstelle 18	Strom 18
Messstelle 19	Strom 19
Messstelle 20	Strom 20
Messstelle 28	Strom 28
Messstelle 29	Strom 29
Messstelle 30	Strom 30
Messstelle 31	Strom 31
Messstelle 22	Strom 22

Messstelle 23	Strom 23
Messstelle 24	Strom 24
Messstelle 32	Strom 32
Messstelle 25	Strom 25
Messstelle 26	Strom 26
Messstelle 33	Strom 33
Messstelle 27	Strom 27

Tab. 7-2: Tabellarische Auflistung der Eingangsströme der gegebenen Bilanz. Die orange markierten Messstellen werden im Modell als „Strom 67“ zusammengefasst

Messstelle (tag number)	Beschreibung
Messstelle 50	Strom 50
Messstelle 52	Strom 52
Messstelle 51	Strom 51
Messstelle 53	Strom 53
Messstelle 54	Strom 54
Messstelle 56	Strom 56
Messstelle 57	Strom 57
Messstelle 67	Strom 67
Messstelle 68	Strom 68
Messstelle 69	Strom 69
Messstelle 58	Strom 58
Messstelle 59	Strom 59
Messstelle 60	Strom 60
Messstelle 61	Strom 61
Messstelle 62	Strom 62

Messstelle 63	Strom 63
Messstelle 64	Strom 64
Messstelle 65	Strom 65
Messstelle 66	Strom 66

Tab. 7-3: Tabellarische Auflistung der Ausgangsströme mit Berücksichtigung des Fackelgases. Die blau markierten Messstellen sind die Mischgasschienen, von denen aus die meisten Heizgasverbraucher in der Raffinerie mit Mischgas versorgt werden.

Messstelle (tag number)	Beschreibung
Messstelle 50	Strom 50
Messstelle 52	Strom 52
Messstelle 51	Strom 51
Messstelle 53	Strom 53
Messstelle 54	Strom 54
Messstelle 56	Strom 56
Messstelle 57	Strom 57
Messstelle 67	Strom 67
Messstelle 68	Strom 68
Messstelle 69	Strom 69
Messstelle 58	Strom 58
Messstelle 59	Strom 59
Messstelle 60	Strom 60

Tab. 7-4: Tabellarische Auflistung der Ausgangsströme ohne Berücksichtigung des Fackelgases. Die blau markierten Messstellen sind die Mischgasschienen, von denen aus die meisten Heizgasverbraucher in der Raffinerie mit Mischgas versorgt werden.

---

Messstelle (tag number)	Beschreibung
Messstelle 34	Strom 34
Messstelle 35	Strom 35
Messstelle 36	Strom 36
Messstelle 37	Strom 37
Messstelle 38	Strom 38
Messstelle 39	Strom 39
Messstelle 40	Strom 40
Messstelle 41	Strom 41
Messstelle 42	Strom 42
Messstelle 43	Strom 43
Messstelle 44	Strom 44
Messstelle 45	Strom 45
Messstelle 46	Strom 46
Messstelle 47	Strom 47
Messstelle 48	Strom 48
Messstelle 49	Strom 49
Messstelle 50	Strom 50
Messstelle 51	Strom 51
Messstelle 52	Strom 52
Messstelle 53	Strom 53
Messstelle 54	Strom 54
Messstelle 55	Strom 55
Messstelle 56	Strom 56
Messstelle 57	Strom 57
Messstelle 58	Strom 58
Messstelle 59	Strom 59

Messstelle 60	Strom 60
Messstelle 61	Strom 61
Messstelle 62	Strom 62
Messstelle 63	Strom 63
Messstelle 64	Strom 64
Messstelle 65	Strom 65
Messstelle 66	Strom 66

Tab. 7-5: Tabellarische Auflistung der Ausgangsströme mit Berücksichtigung des Fackelgases. Die blau markierten Messstellen sind die Heizgasverbraucher, die von den Mischgasschienen mit Heizgas versorgt werden.

Messstelle (tag number)	Beschreibung
Messstelle 34	Strom 34
Messstelle 35	Strom 35
Messstelle 36	Strom 36
Messstelle 37	Strom 37
Messstelle 38	Strom 38
Messstelle 39	Strom 39
Messstelle 40	Strom 40
Messstelle 41	Strom 41
Messstelle 42	Strom 42
Messstelle 43	Strom 43
Messstelle 44	Strom 44
Messstelle 45	Strom 45
Messstelle 46	Strom 46
Messstelle 47	Strom 47
Messstelle 48	Strom 48

---

Messstelle 49	Strom 49
Messstelle 50	Strom 50
Messstelle 51	Strom 51
Messstelle 52	Strom 52
Messstelle 53	Strom 53
Messstelle 54	Strom 54
Messstelle 55	Strom 55
Messstelle 56	Strom 56
Messstelle 57	Strom 57
Messstelle 58	Strom 58
Messstelle 59	Strom 59
Messstelle 60	Strom 60

---

Tab. 7-6: Tabellarische Auflistung der Ausgangsströme ohne Berücksichtigung des Fackelgases. Die blau markierten Messstellen sind die Heizgasverbraucher, die von den Mischgasschienen mit Heizgas versorgt werden.



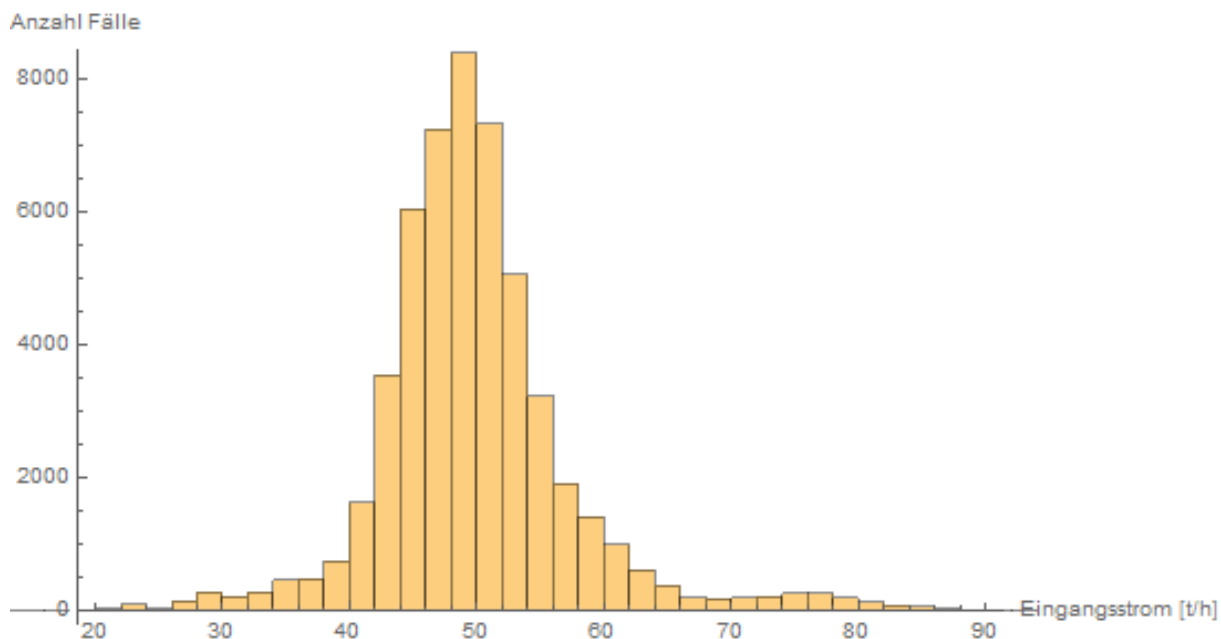


Abb. 7-10: Histogramm der Summe aller Eingangsströme der eigenen Bilanz

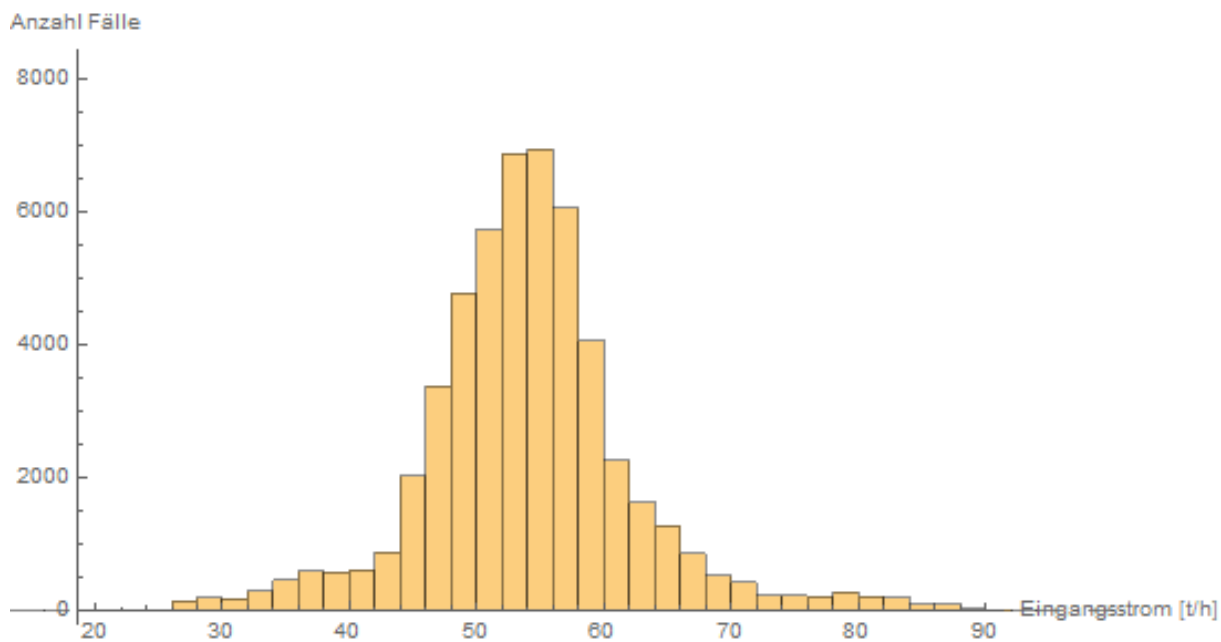


Abb. 7-11: Histogramm der Summe aller Eingangsströme der gegebenen Bilanz

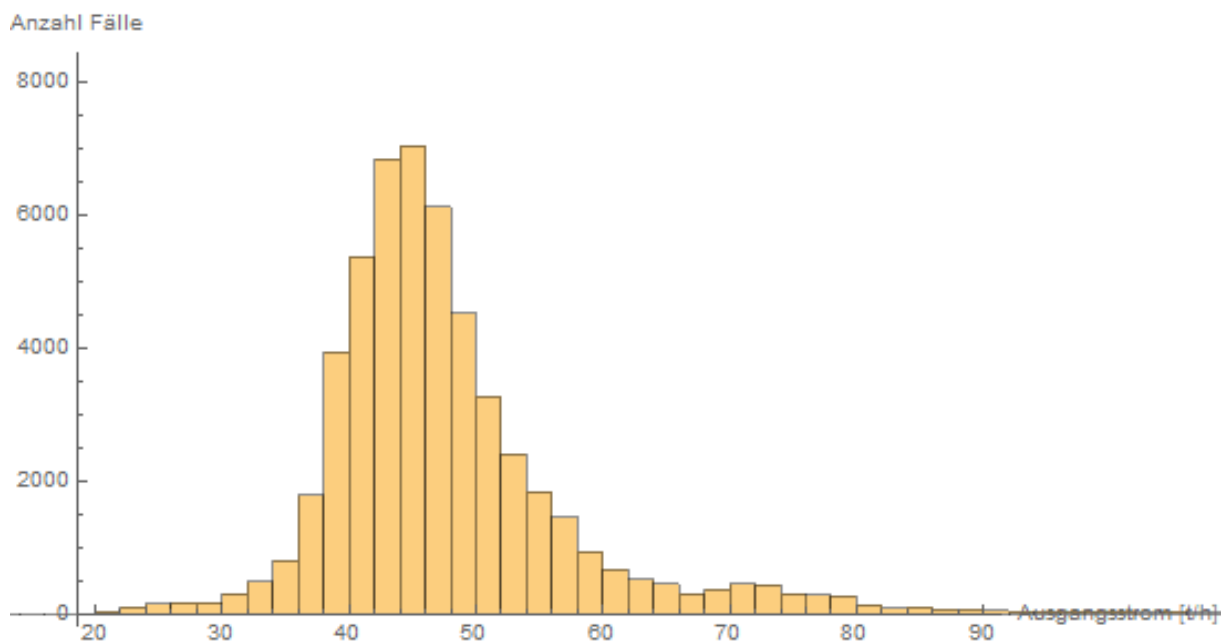


Abb. 7-12: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme mit den Mischgasschienen unter Berücksichtigung vom Fackelgas

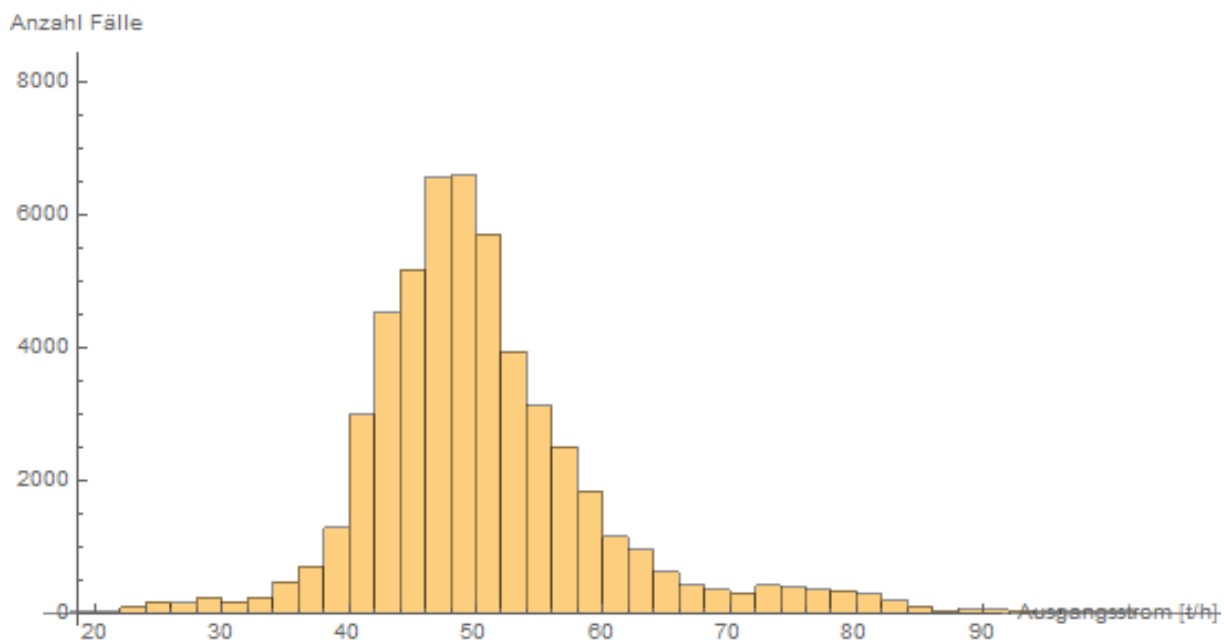


Abb. 7-13: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme mit den Endverbrauchern unter Berücksichtigung vom Fackelgas

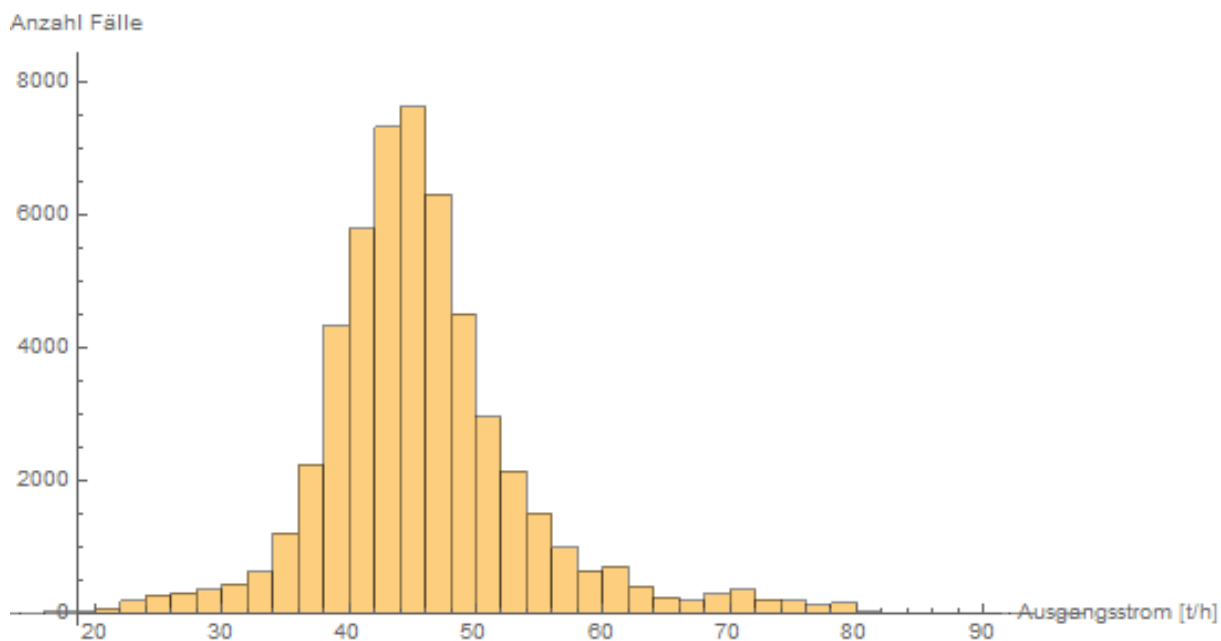


Abb. 7-14: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme mit den Mischgasschienen ohne Berücksichtigung vom Fackelgas

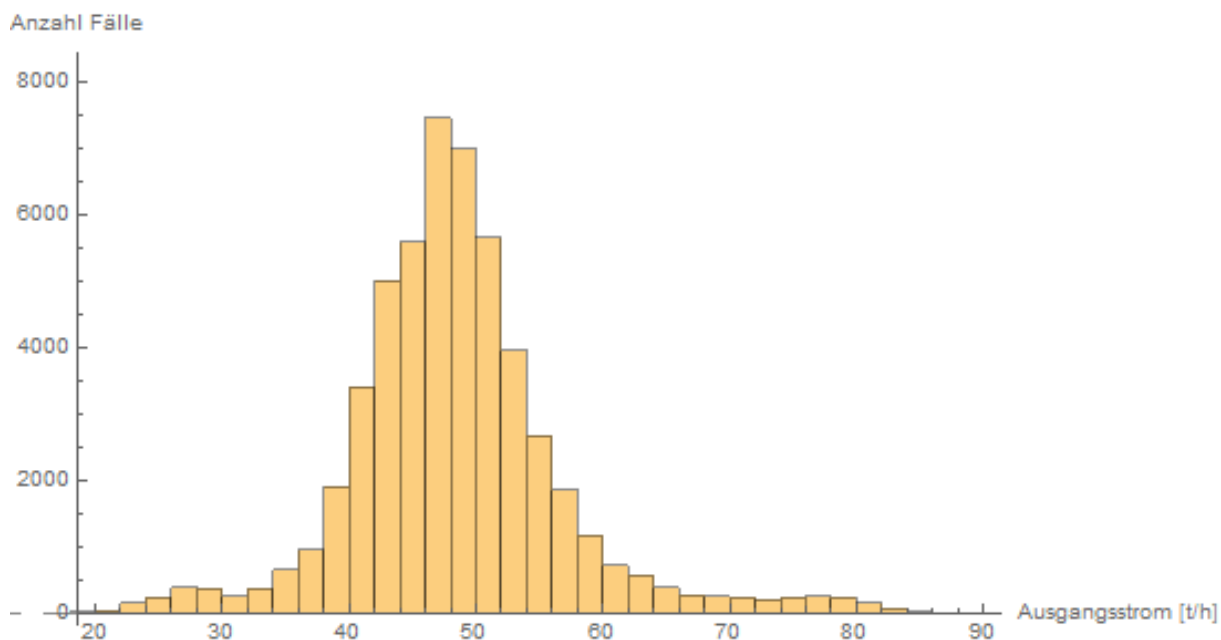


Abb. 7-15: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme mit den Endverbrauchern ohne Berücksichtigung vom Fackelgas

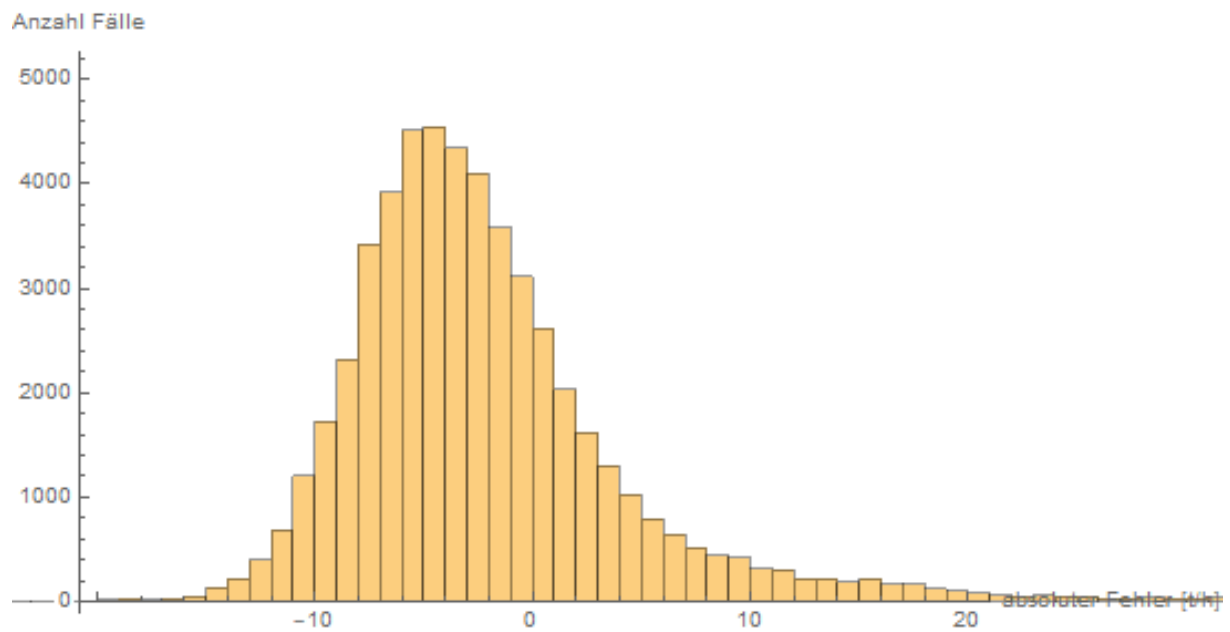


Abb. 7-16: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 1

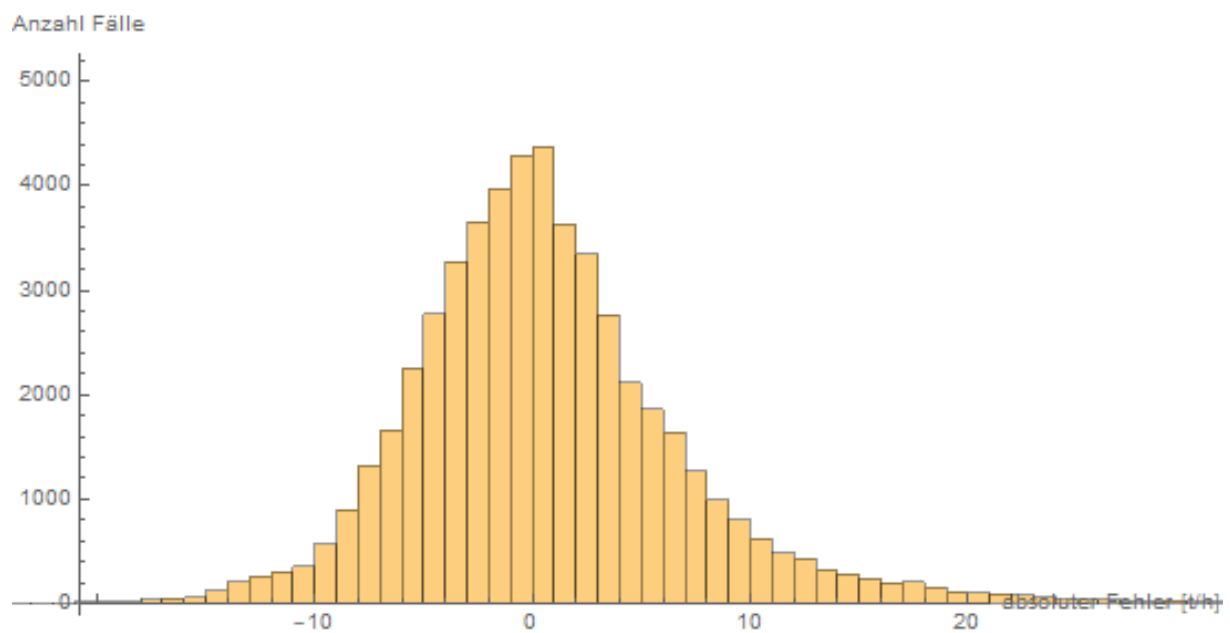


Abb. 7-17: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 2

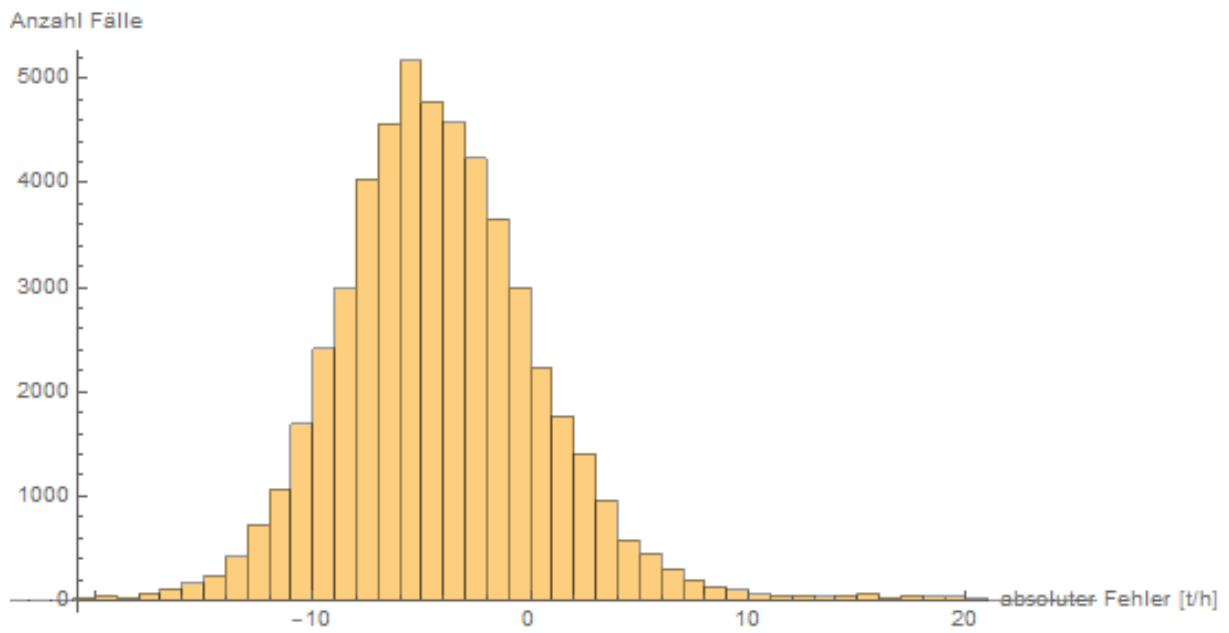


Abb. 7-18: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 3

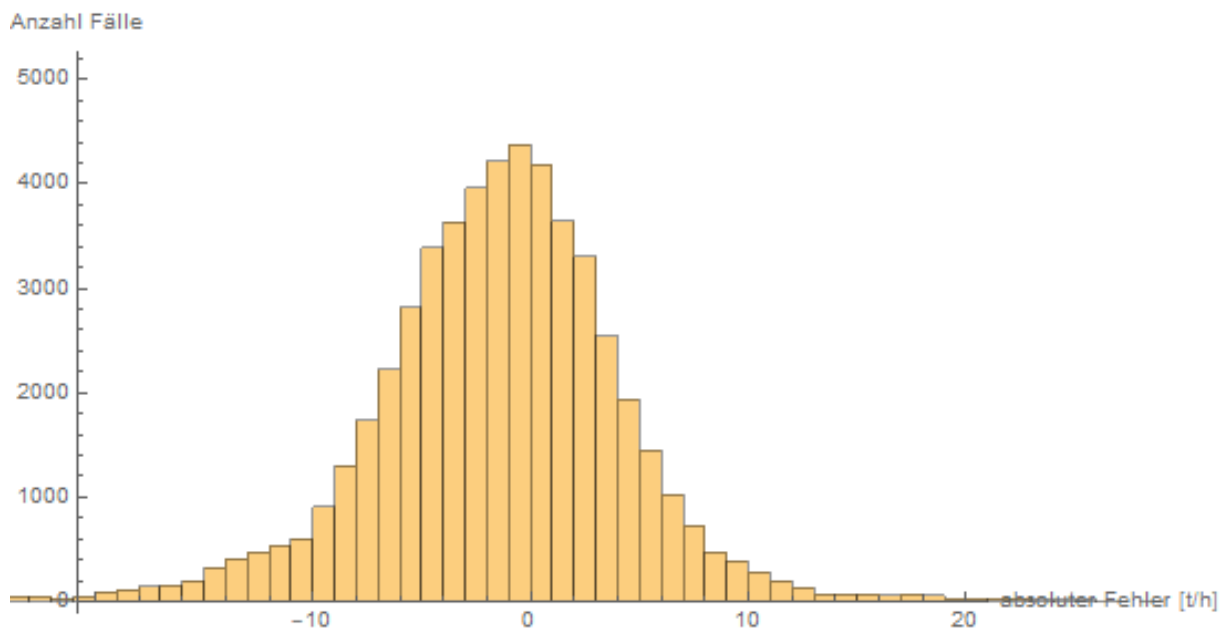


Abb. 7-19: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 4

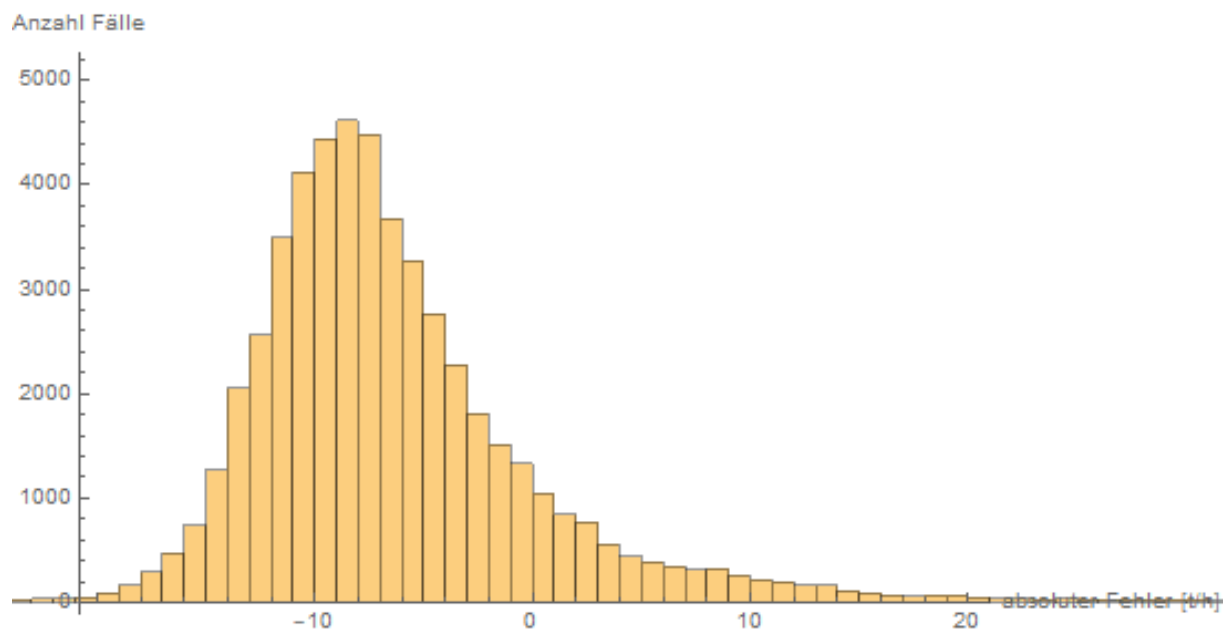


Abb. 7-20: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 5

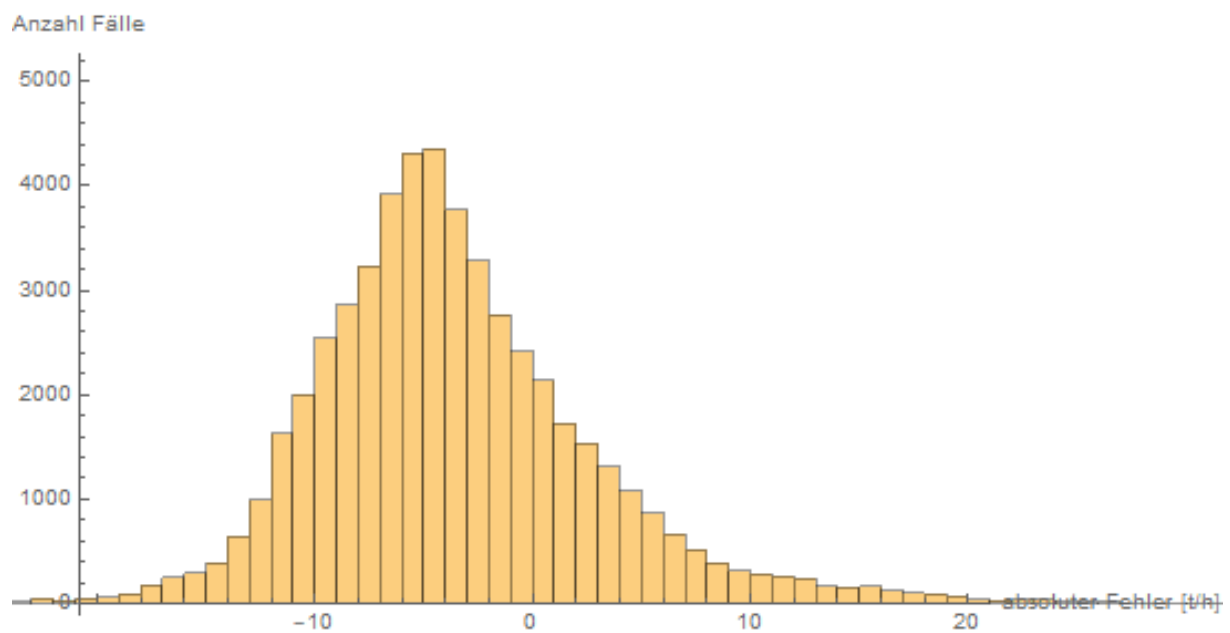


Abb. 7-21: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 6

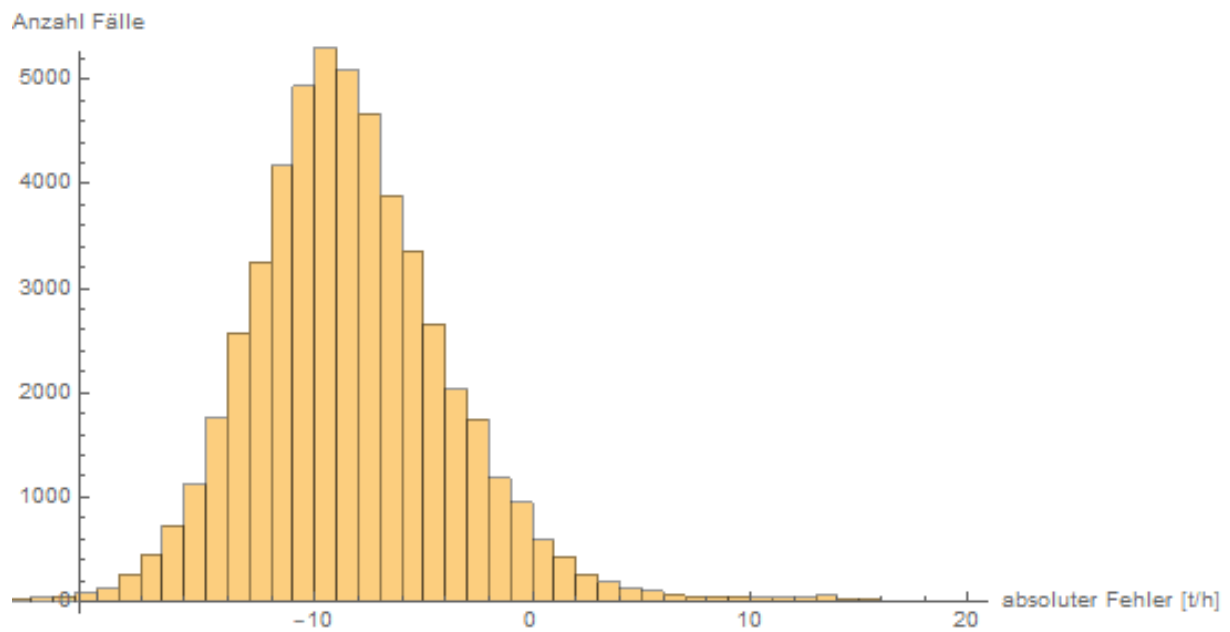


Abb. 7-22: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 7

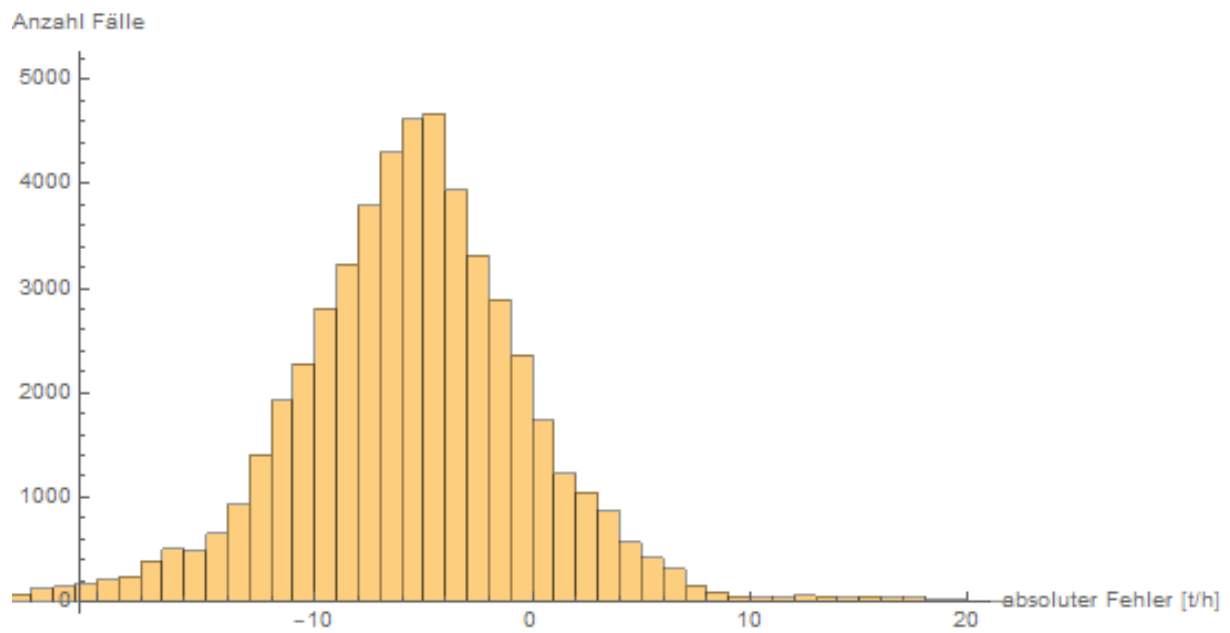


Abb. 7-23: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 8

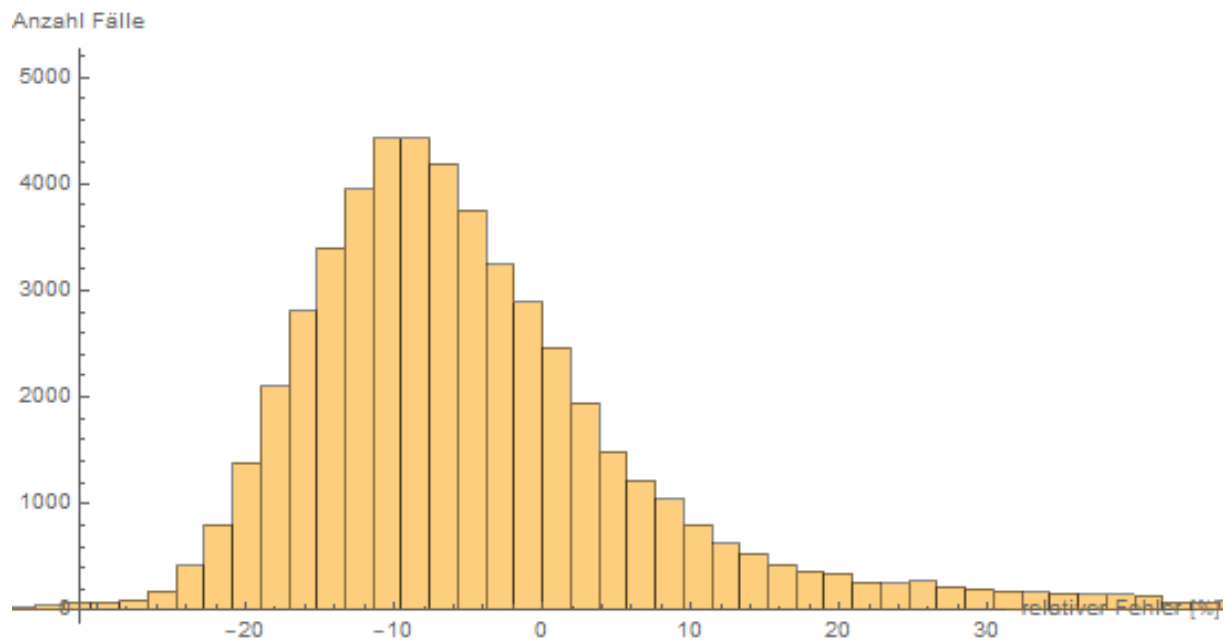


Abb. 7-24: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 1



Abb. 7-25: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 2





Abb. 7-26: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 3

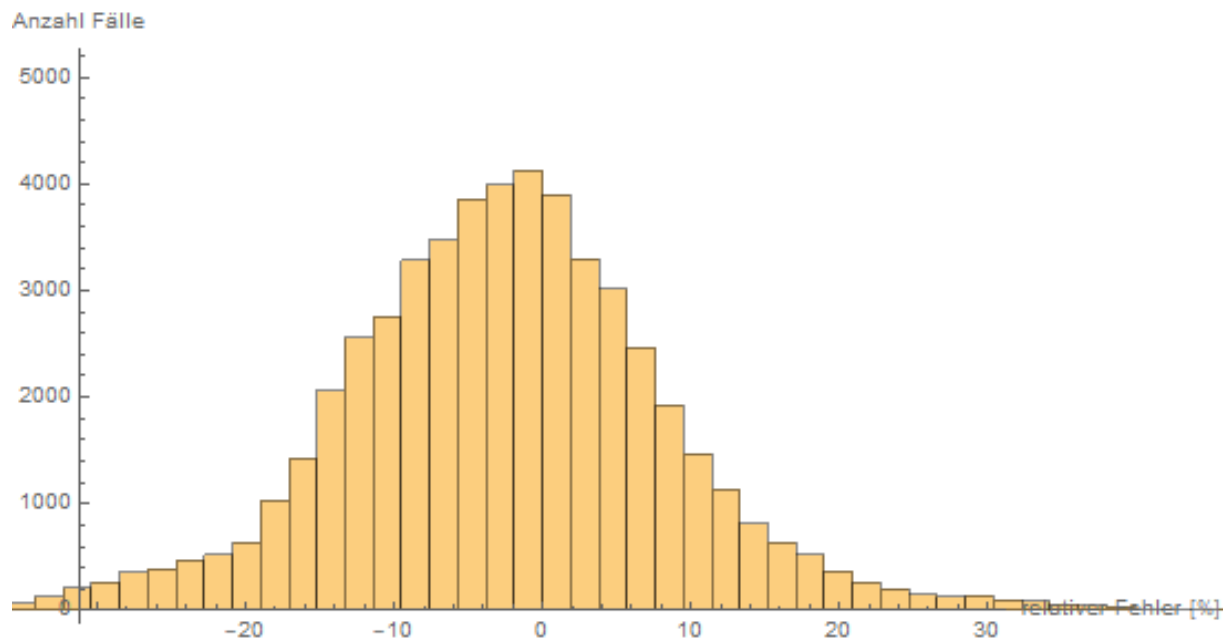


Abb. 7-27: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 4

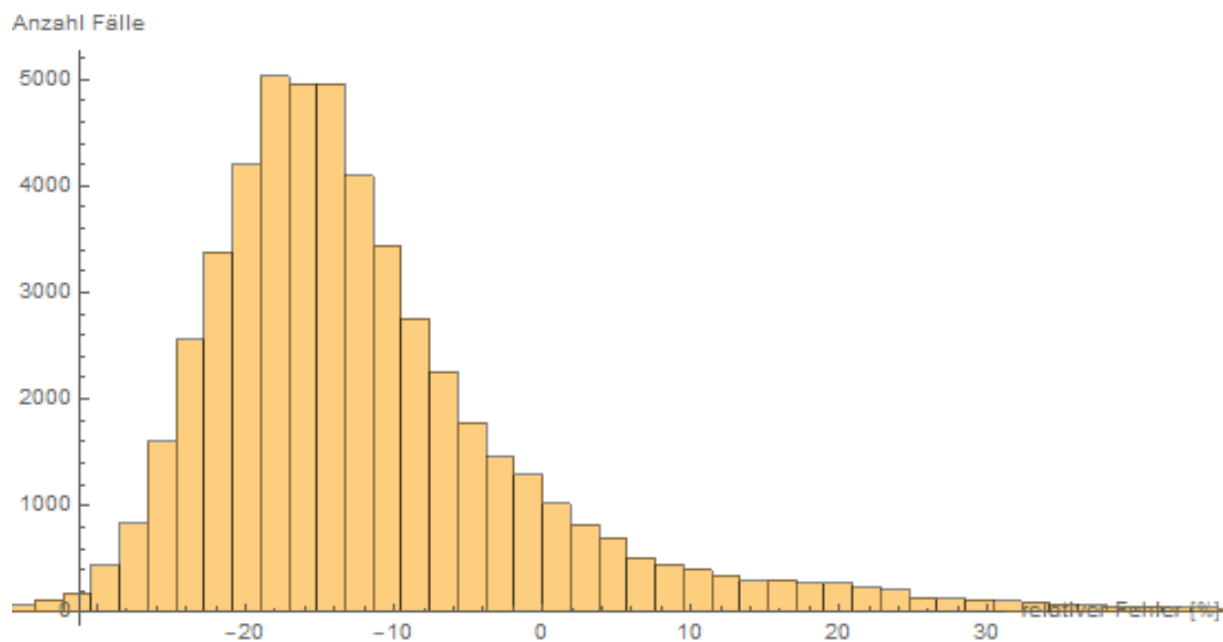


Abb. 7-28: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 5

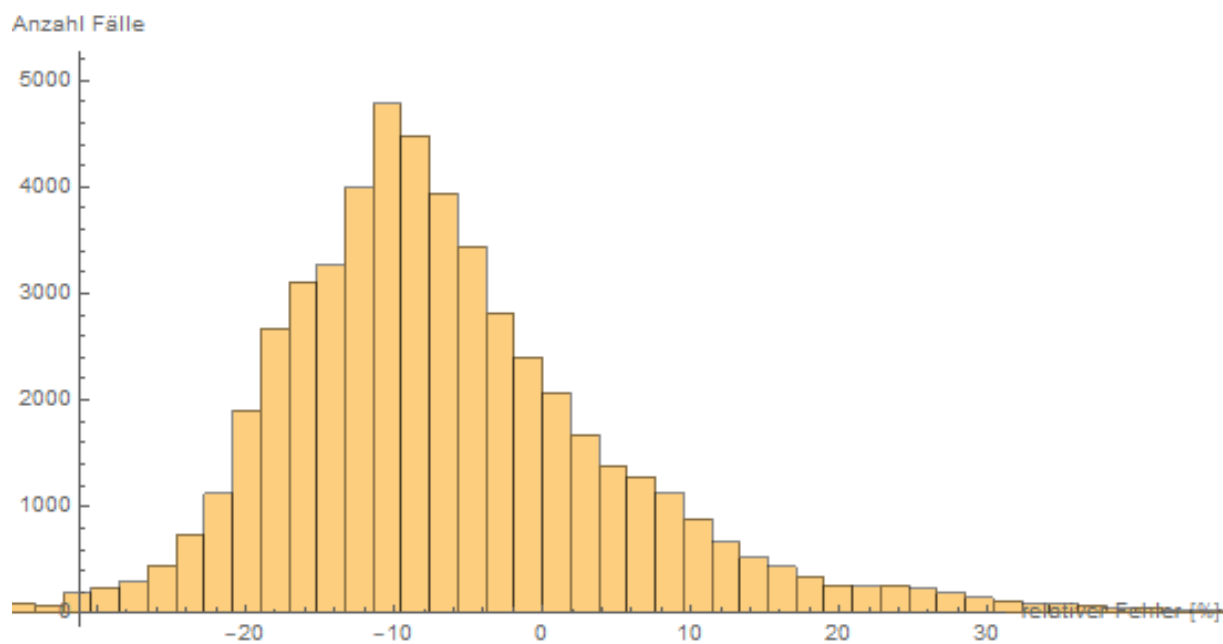


Abb. 7-29: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 6

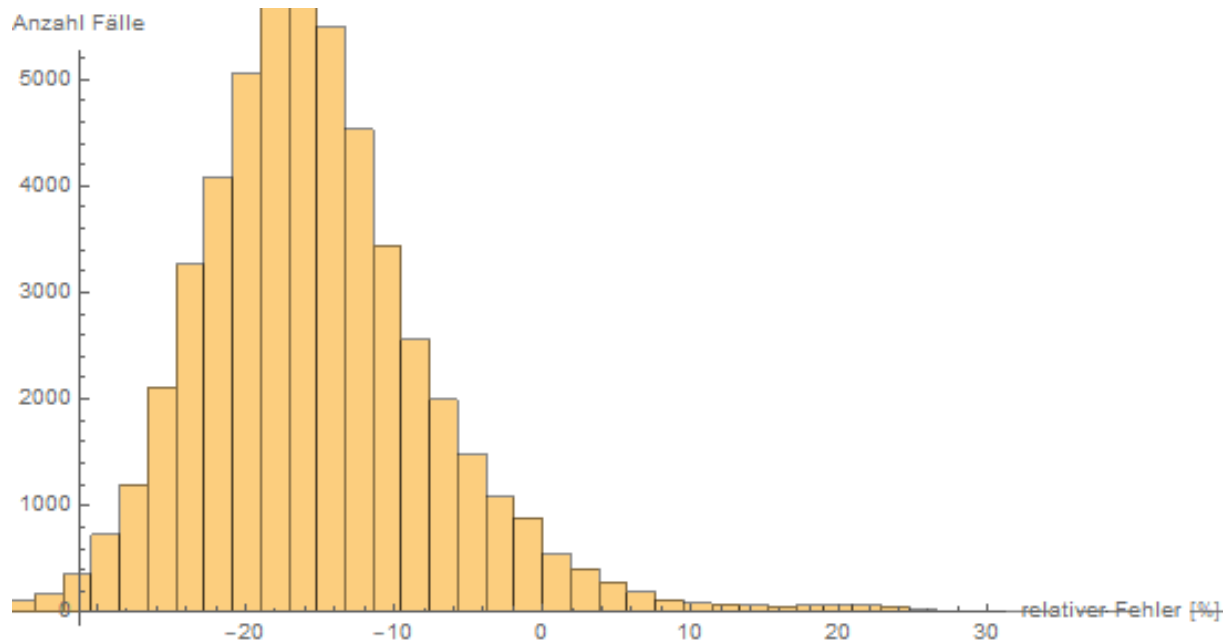


Abb. 7-30: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 7

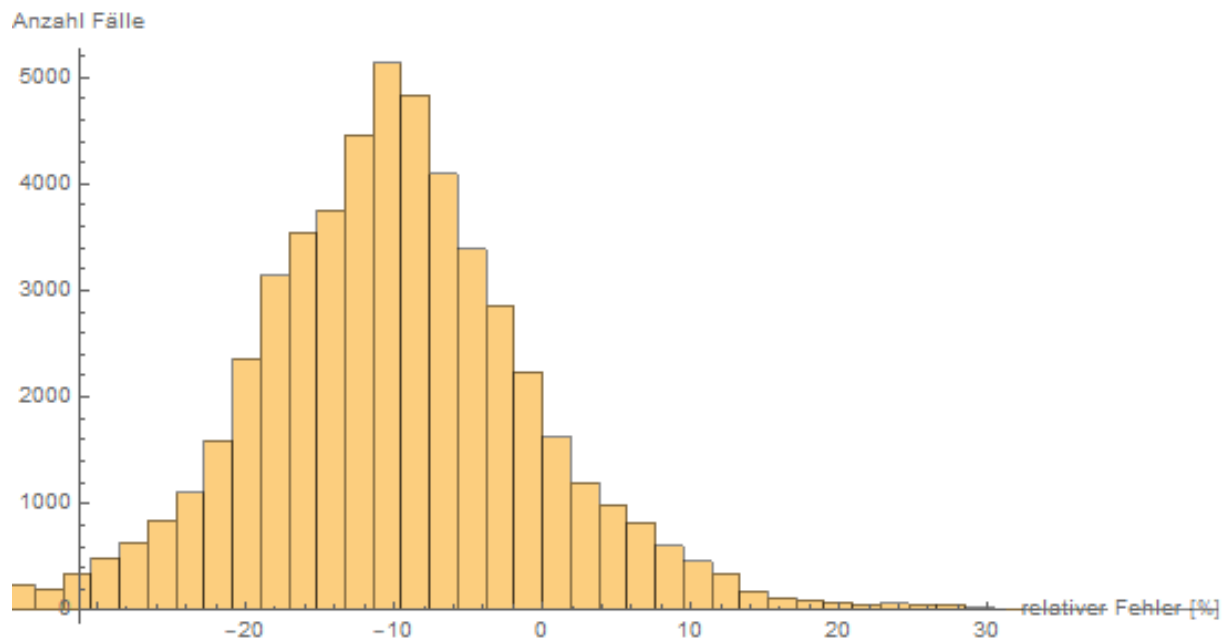


Abb. 7-31: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 8

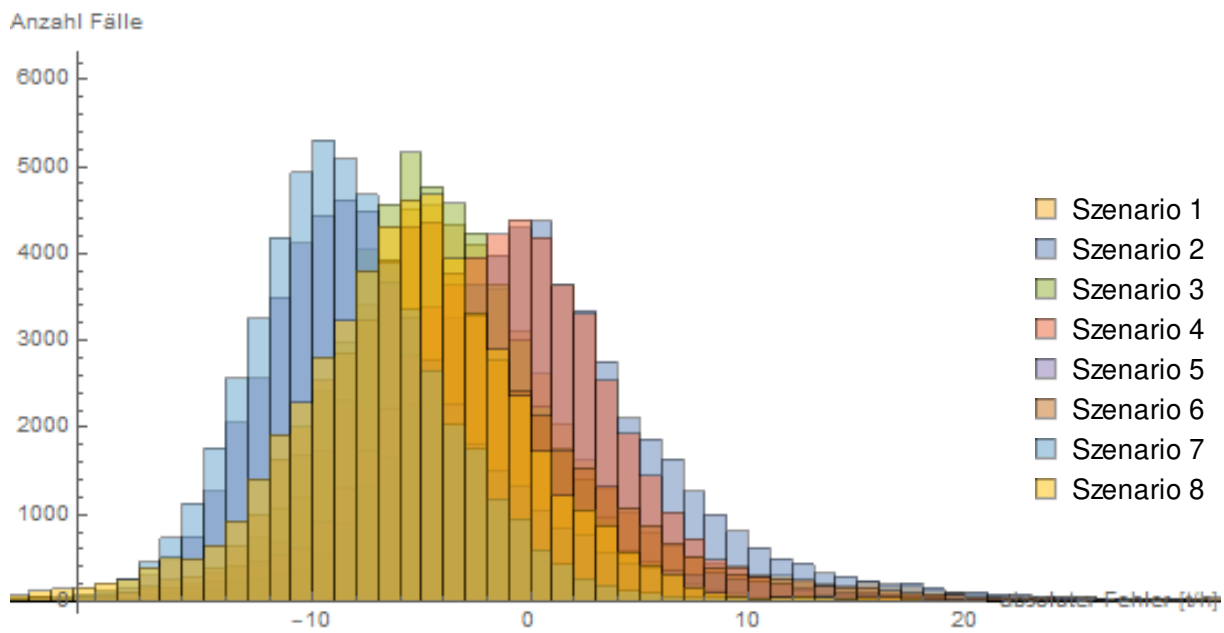


Abb. 7-32: Vergleich der Histogramme (absoluter Fehler)

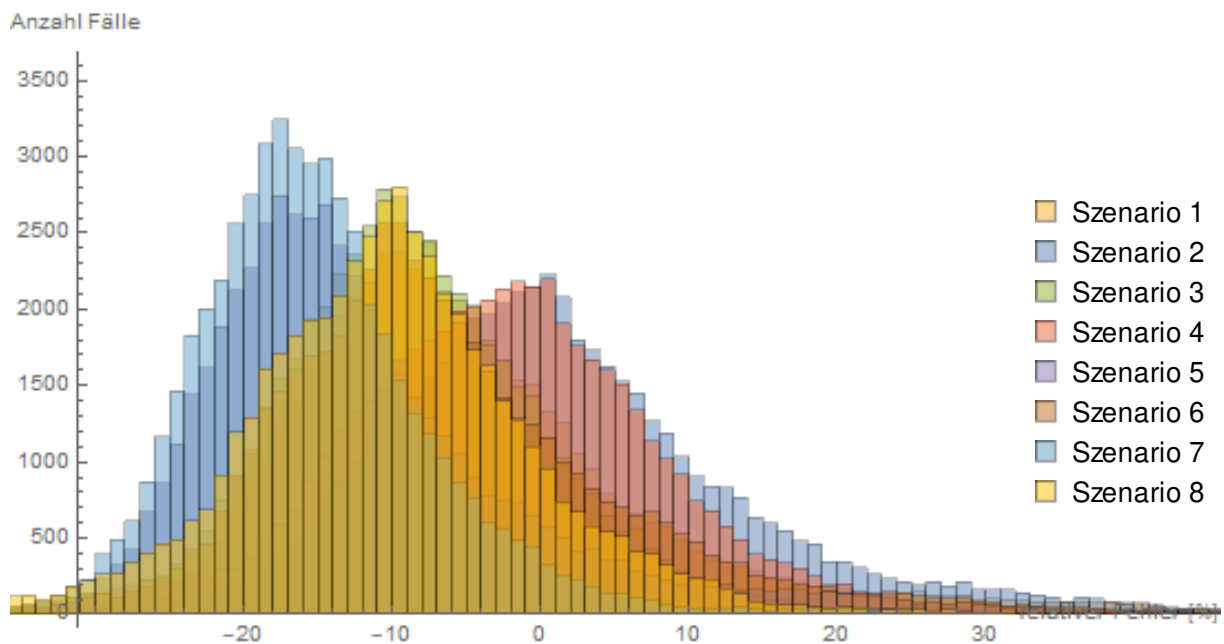


Abb. 7-33: Vergleich der Histogramme (relativer Fehler)

## 7.2 Modellierung

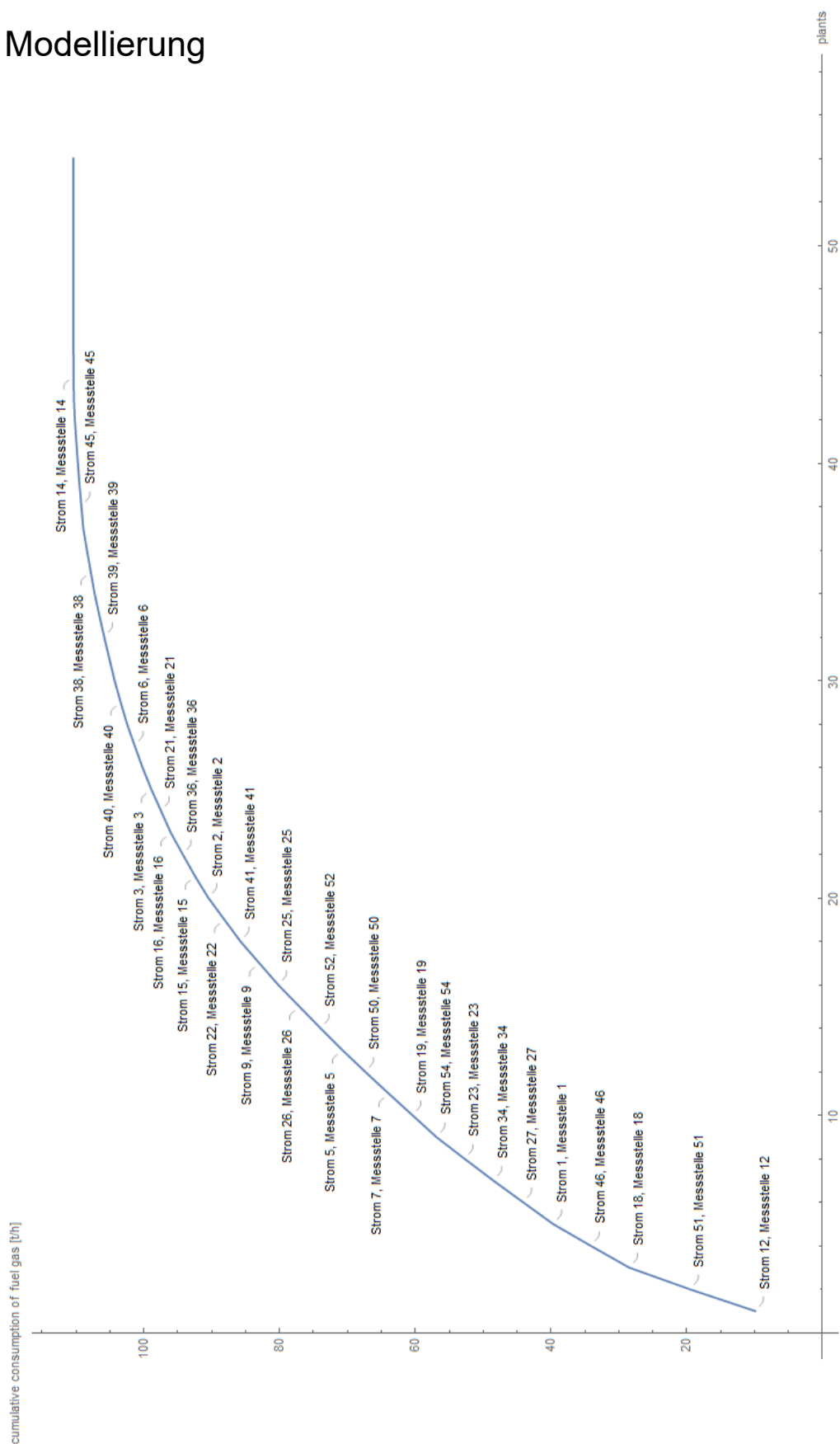


Abb. 7-34: grafische Darstellung der ABC-Analyse über den Mischgasverbrauch (t/h) für den 28.04.2014, 14:00

---

Anlage	Verbrauch [t/h]	Verbrauch [%]
Strom 12, Messstelle 12	9,924	8,990
Strom 51, Messstelle 51	9,602	8,699
Strom 18, Messstelle 18	8,951	8,109
Strom 46, Messstelle 46	5,661	5,128
Strom 1, Messstelle 1	5,544	5,022
Strom 27, Messstelle 27	4,420	4,004
Strom 34, Messstelle 34	4,398	3,984
Strom 23, Messstelle 23	4,241	3,842
Strom 54, Messstelle 54	4,147	3,757
Strom 19, Messstelle 19	3,521	3,190
Strom 7, Messstelle 7	3,510	3,180
Strom 50, Messstelle 50	3,455	3,130
Strom 5, Messstelle 5	3,380	3,062
Strom 52, Messstelle 52	3,197	2,897
Strom 26, Messstelle 26	3,130	2,835
Strom 25, Messstelle 25	3,123	2,829
Strom 9, Messstelle 9	2,800	2,535
Strom 41, Messstelle 41	2,775	2,514
Strom 22, Messstelle 22	2,367	2,144
Strom 2, Messstelle 2	2,364	2,142
Strom 15, Messstelle 15	1,963	1,778
Strom 36, Messstelle 36	1,810	1,639
Strom 16, Messstelle 16	1,768	1,602
Strom 21, Messstelle 21	1,438	1,302
Strom 3, Messstelle 3	1,436	1,301
Strom 35, Messstelle 35	1,292	1,170
Strom 6, Messstelle 6	1,152	1,044

---

Strom 20, Messstelle 20	1,126	1,020
Strom 40, Messstelle 40	0,943	0,854
Strom 49, Messstelle 49	0,894	0,810
Strom 11, Messstelle 11	0,768	0,696
Strom 39, Messstelle 39	0,759	0,687
Strom 59, Messstelle 59	0,729	0,660
Strom 37, Messstelle 37	0,691	0,626
Strom 38, Messstelle 38	0,568	0,514
Strom 47, Messstelle 47	0,565	0,512
Strom 10, Messstelle 10	0,531	0,481
Strom 45, Messstelle 45	0,285	0,258
Strom 48, Messstelle 48	0,271	0,246
Strom 44, Messstelle 44	0,247	0,224
Strom 8, Messstelle 8	0,224	0,203
Strom 43, Messstelle 43	0,222	0,201
Strom 42, Messstelle 42	0,140	0,127
Strom 14, Messstelle 14	0,038	0,035
Strom 13, Messstelle 13	0,015	0,014
Strom 60, Messstelle 60	0,000	0,000
Strom 58, Messstelle 58	0,000	0,000
Strom 57, Messstelle 57	0,000	0,000
Strom 56, Messstelle 56	0,000	0,000
Strom 55, Messstelle 55	0,000	0,000
Strom 53, Messstelle 53	0,000	0,000
Strom 24, Messstelle 24	0,000	0,000
Strom 17, Messstelle 17	0,000	0,000
Strom 4, Messstelle 4	0,000	0,000

---

Tab. 7-7: tabellarische Darstellung der ABC-Analyse über die Ein- und Ausgangsströme (t/h) für den 28.04.2014, 14:00

	Anlage	gesamter, relativer Verbrauch [%]
Gruppe A	Strom 12, Messstelle 12	25,7987
	Strom 51, Messstelle 51	
	Strom 18, Messstelle 18	
Gruppe B	Strom 46, Messstelle 46	46,8604
	Strom 1, Messstelle 1	
	Strom 27, Messstelle 27	
	Strom 34, Messstelle 34	
	Strom 23, Messstelle 23	
	Strom 54, Messstelle 54	
	Strom 19, Messstelle 19	
	Strom 7, Messstelle 7	
	Strom 50, Messstelle 50	
	Strom 5, Messstelle 5	
	Strom 52, Messstelle 52	
	Strom 26, Messstelle 26	
	Strom 25, Messstelle 25	
Gruppe C	Strom 9, Messstelle 9	27,3409
	Strom 41, Messstelle 41	
	Strom 22, Messstelle 22	
	Strom 2, Messstelle 2	
	Strom 15, Messstelle 15	
	Strom 36, Messstelle 36	
	Strom 16, Messstelle 16	
	Strom 21, Messstelle 21	



---

Strom 3, Messstelle 3  
Strom 35, Messstelle 35  
Strom 6, Messstelle 6  
Strom 20, Messstelle 20  
Strom 40, Messstelle 40  
Strom 49, Messstelle 49  
Strom 11, Messstelle 11  
Strom 39, Messstelle 39  
Strom 59, Messstelle 59  
Strom 37, Messstelle 37  
Strom 38, Messstelle 38  
Strom 47, Messstelle 47  
Strom 10, Messstelle 10  
Strom 45, Messstelle 45  
Strom 48, Messstelle 48  
Strom 44, Messstelle 44  
Strom 8, Messstelle 8  
Strom 43, Messstelle 43  
Strom 42, Messstelle 42  
Strom 14, Messstelle 14  
Strom 13, Messstelle 13  
Strom 60, Messstelle 60  
Strom 58, Messstelle 58  
Strom 57, Messstelle 57  
Strom 56, Messstelle 56  
Strom 55, Messstelle 55  
Strom 53, Messstelle 53  
Strom 24, Messstelle 24

---

Strom 17, Messstelle 17

Strom 4, Messstelle 4

---

Tab. 7-8: Zusammenfassung der Anlagen in Gruppe A (hohe Priorität), Gruppe B („mittlere Priorität“) und Gruppe C („niedrige Priorität“) bei einer jeweils oberen Schranke von 30 % für Gruppe A und Gruppe C über den Mischgasverbrauch (t/h) für den 28.04.2014, 14:00

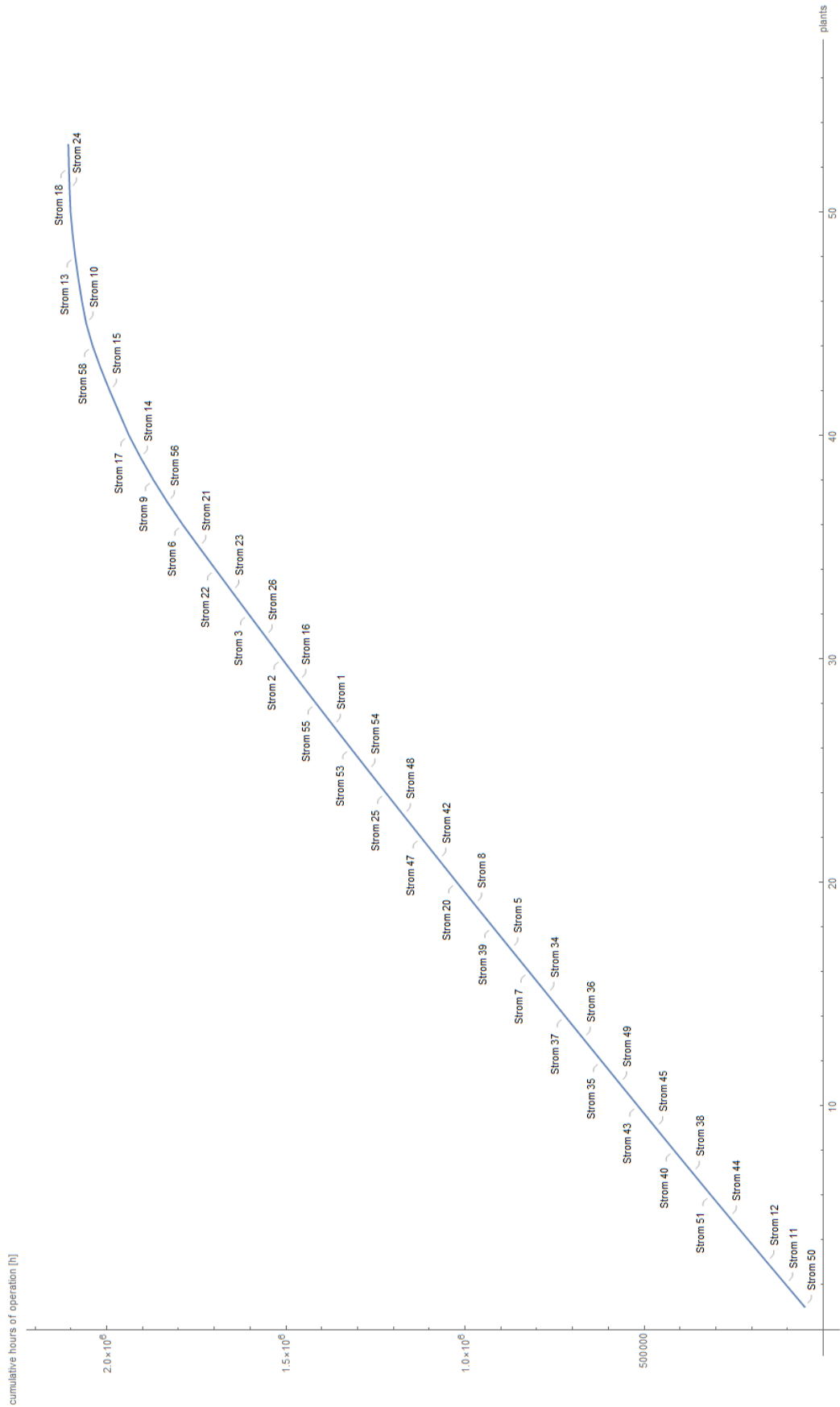


Abb. 7-35: grafische Darstellung der ABC-Analyse der Betriebsstunden vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00)

---

Anlage	Betriebsstunden [h]	Betriebsstunden, relativ [%]
Strom 50, Messstelle 50	52568	2,494
Strom 11, Messstelle 11	52568	2,494
Strom 12, Messstelle 12	52562	2,494
Strom 46, Messstelle 46	52260	2,480
Strom 44, Messstelle 44	52191	2,477
Strom 51, Messstelle 51	51907	2,463
Strom 38, Messstelle 38	51347	2,436
Strom 40, Messstelle 40	51297	2,434
Strom 45, Messstelle 45	50960	2,418
Strom 43, Messstelle 43	50620	2,402
Strom 49, Messstelle 49	50590	2,401
Strom 35, Messstelle 35	50583	2,400
Strom 36, Messstelle 36	50577	2,400
Strom 37, Messstelle 37	50572	2,400
Strom 34, Messstelle 34	50572	2,400
Strom 7, Messstelle 7	50563	2,399
Strom 5, Messstelle 5	50526	2,397
Strom 39, Messstelle 39	50486	2,396
Strom 8, Messstelle 8	50457	2,394
Strom 20, Messstelle 20	50074	2,376
Strom 42, Messstelle 42	49883	2,367
Strom 47, Messstelle 47	49626	2,355
Strom 48, Messstelle 48	49497	2,349
Strom 25, Messstelle 25	49229	2,336
Strom 54, Messstelle 54	49175	2,333

---

Strom 53, Messstelle 53	48740	2,313
Strom 1, Messstelle 1	48393	2,296
Strom 55, Messstelle 55	48316	2,293
Strom 16, Messstelle 16	47744	2,265
Strom 2, Messstelle 2	47089	2,234
Strom 26, Messstelle 26	46715	2,217
Strom 3, Messstelle 3	46659	2,214
Strom 23, Messstelle 23	46392	2,201
Strom 22, Messstelle 22	46094	2,187
Strom 21, Messstelle 21	46092	2,187
Strom 6, Messstelle 6	45392	2,154
Strom 56, Messstelle 56	42510	2,017
Strom 9, Messstelle 9	39354	1,867
Strom 14, Messstelle 14	35731	1,695
Strom 17, Messstelle 17	32649	1,549
Strom 59, Messstelle 59	26933	1,278
Strom 15, Messstelle 15	26917	1,277
Strom 52, Messstelle 52	24952	1,184
Strom 58, Messstelle 58	22479	1,067
Strom 10, Messstelle 10	17831	0,846
Strom 41, Messstelle 41	12034	0,571
Strom 57, Messstelle 57	9934	0,471
Strom 13, Messstelle 13	8897	0,422
Strom 27, Messstelle 27	7323	0,347
Strom 19, Messstelle 19	5659	0,269
Strom 24, Messstelle 24	2507	0,119
Strom 18, Messstelle 18	2017	0,096
Strom 60, Messstelle 60	1407	0,067

---

Tab. 7-9: tabellarische Darstellung der ABC-Analyse der Betriebsstunden vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00). Die orange markierten Messstellen wurden bei der Bestimmung der Betriebsstunde 02.05.2014 (22:00) vernachlässigt.

	Anlage	Gesamte, relative Betriebsstunde [%]
Gruppe A	Strom 50, Messstelle 50	29,393
	Strom 11, Messstelle 11	
	Strom 12, Messstelle 12	
	Strom 46, Messstelle 46	
	Strom 44, Messstelle 44	
	Strom 51, Messstelle 51	
	Strom 38, Messstelle 38	
	Strom 40, Messstelle 40	
	Strom 45, Messstelle 45	
	Strom 43, Messstelle 43	
	Strom 49, Messstelle 49	
	Strom 35, Messstelle 35	
Gruppe B	Strom 36, Messstelle 36	42,303
	Strom 37, Messstelle 37	
	Strom 34, Messstelle 34	
	Strom 7, Messstelle 7	
	Strom 5, Messstelle 5	
	Strom 39, Messstelle 39	
	Strom 8, Messstelle 8	
	Strom 20, Messstelle 20	
	Strom 42, Messstelle 42	
	Strom 47, Messstelle 47	

---

	Strom 48, Messstelle 48	
	Strom 25, Messstelle 25	
	Strom 54, Messstelle 54	
	Strom 53, Messstelle 53	
	Strom 1, Messstelle 1	
	Strom 55, Messstelle 55	
	Strom 16, Messstelle 16	
	Strom 2, Messstelle 2	
	<hr/>	
Gruppe C	Strom 26, Messstelle 26	28,303
	Strom 3, Messstelle 3	
	Strom 23, Messstelle 23	
	Strom 22, Messstelle 22	
	Strom 21, Messstelle 21	
	Strom 6, Messstelle 6	
	Strom 56, Messstelle 56	
	Strom 9, Messstelle 9	
	Strom 14, Messstelle 14	
	Strom 17, Messstelle 17	
	Strom 59, Messstelle 59	
	Strom 15, Messstelle 15	
	Strom 52, Messstelle 52	
	Strom 58, Messstelle 58	
	Strom 10, Messstelle 10	
	Strom 41, Messstelle 41	
	Strom 57, Messstelle 57	
	Strom 13, Messstelle 13	
	Strom 27, Messstelle 27	
	Strom 19, Messstelle 19	

Strom 24, Messstelle 24

Strom 18, Messstelle 18

Strom 60, Messstelle 60

Tab. 7-10: Zusammenfassung der Anlagen in Gruppe A (hohe Priorität), Gruppe B („mittlere Priorität“) und Gruppe C („niedrige Priorität“) bei einer jeweils oberen Schranke von 30 % für Gruppe A und Gruppe C der Betriebsstunden vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00). Die orange markierten Messstellen wurden bei der Bestimmung der Betriebsstunde 02.05.2014 (22:00) vernachlässigt.

Komponente	MG 1	MG 2	Strom 53	Strom 54
	[gew.-%]	[gew.-%]	[gew.-%]	[gew.-%]
Hydrogen	20,43	0,75	0,01	0,00
Methane	23,56	86,00	1,68	0,73
Ethylene	4,14	1,22	24,39	0,00
Ethane	12,60	2,58	42,64	43,40
Propene	1,23	0,02	11,29	0,01
Propane	18,99	1,08	3,41	35,52
12-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
13-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butene	0,01	0,00	0,00	0,00
1-Butene	1,38	0,00	16,46	0,01
tr2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
cis2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butane	2,47	0,11	0,00	2,24
n-Butane	1,69	0,11	0,00	13,43
i-Pentane	0,65	0,01	0,00	0,12
n-Pentane	0,59	0,00	0,00	3,12
H2O	0,41	0,00	0,00	1,31



---

Nitrogen	3,23	5,42	0,11	0,01
CO	0,35	0,15	0,02	0,00
CO2	0,76	2,53	0,00	0,00
Oxygen	0,12	0,02	0,00	0,02
2-Mpentane	0,23	0,00	0,00	0,00
3-Mpentane	0,39	0,00	0,00	0,00
n-Hexane	2,07	0,00	0,00	0,01
Mcyclopentane	0,90	0,00	0,00	0,00
23-Mpentane	0,09	0,00	0,00	0,00
22-Mpentane	0,03	0,00	0,00	0,00
Benzene	0,23	0,00	0,00	0,00
24-Mpentane	0,09	0,00	0,00	0,00
Cyclohexane	0,64	0,00	0,00	0,00
223-Mbutane	0,01	0,00	0,00	0,00
33-Mpentane	0,02	0,00	0,00	0,00
11Mcycpentan	0,06	0,00	0,00	0,00
233-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
2-Mhexane	0,34	0,00	0,00	0,00
1-ci3-MCC5	0,12	0,00	0,00	0,00
3-Mhexane	0,36	0,00	0,00	0,00
1-tr3-MCC5	0,12	0,00	0,00	0,00
1-tr2-MCC5	0,24	0,00	0,00	0,00
1-Heptene	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Heptane	0,47	0,00	0,00	0,00
Mcyclohexane	0,33	0,00	0,00	0,00
Toluene	0,12	0,00	0,00	0,00
n-Octane	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Nonane	0,00	0,00	0,00	0,00

H2S	0,00	0,00	0,00	0,00
1-Pentene	0,54	0,00	0,00	0,00
1-Hexene	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclopentane	0,00	0,00	0,00	0,06

Tab. 7-11: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 für die Betriebsstunde vom 28.04.2014 (14:00)

Komponente	Feed1 von [gew.-%]	Feed2 von [gew.-%]	C1-Minus [gew.-%]	C2-Plus [gew.-%]
Hydrogen	0,05	13,68	10,67	0,01
Methane	4,14	29,76	30,50	1,68
Ethylene	25,40	14,87	20,01	24,39
Ethane	41,10	10,98	13,77	42,64
Propene	10,40	0,35	0,27	11,29
Propane	3,14	0,08	0,06	3,41
12-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
13-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
1-Butene	15,16	0,05	0,03	16,46
tr2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
cis2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butane	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Butane	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Pentane	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Pentane	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrogen	0,52	27,19	22,17	0,11
CO	0,08	3,03	2,52	0,02

---

CO2	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxygen	0,00	0,00	0,00	0,00
2-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
3-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Hexane	0,00	0,00	0,00	0,00
Mcyclopentane	0,00	0,00	0,00	0,00
23-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
22-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
Benzene	0,00	0,00	0,00	0,00
24-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclohexane	0,00	0,00	0,00	0,00
223-Mbutane	0,00	0,00	0,00	0,00
33-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
11Mcycpentan	0,00	0,00	0,00	0,00
233-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
2-Mhexane	0,00	0,00	0,00	0,00
1-ci3-MCC5	0,00	0,00	0,00	0,00
3-Mhexane	0,00	0,00	0,00	0,00
1-tr3-MCC5	0,00	0,00	0,00	0,00
1-tr2-MCC5	0,00	0,00	0,00	0,00
1-Heptene	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Heptane	0,00	0,00	0,00	0,00
Mcyclohexane	0,00	0,00	0,00	0,00
Toluene	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Octane	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Nonane	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00
1-Pentene	0,00	0,00	0,00	0,00

1-Hexene	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclopentane	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 7-12: Zusammensetzung der Feed-Ströme von Entmethaner 1, sowie der C1-Minus und des C2-Plus Stromes in Anlage 2 für die Betriebsstunde vom 28.04.2014 (14:00)

Komponente	Feed [gew.-%]	C1-Minus [gew.-%]	C2-Plus [gew.-%]
Hydrogen	4,37	9,78	0,03
Methane	7,75	14,63	2,22
Ethylene	0,00	0,00	0,00
Ethane	8,00	7,43	8,46
Propene	0,04	0,04	0,05
Propane	48,70	39,14	56,37
12-Butadiene	0,00	0,00	0,00
13-Butadiene	0,00	0,00	0,00
i-Butene	0,00	0,00	0,00
1-Butene	0,05	0,04	0,06
tr2-Butene	0,00	0,00	0,00
cis2-Butene	0,00	0,00	0,00
i-Butane	13,06	10,35	15,22
n-Butane	13,39	10,60	15,63
i-Pentane	0,72	0,57	0,84
n-Pentane	0,36	0,28	0,42
H2O	0,00	0,00	0,00
Nitrogen	2,40	5,28	0,10
CO	0,00	0,00	0,00
CO2	0,00	0,00	0,00

---

Oxygen	0,74	1,52	0,10
2-Mpentane	0,00	0,00	0,00
3-Mpentane	0,00	0,00	0,00
n-Hexane	0,08	0,06	0,09
Mcyclopentane	0,00	0,00	0,00
23-Mpentane	0,00	0,00	0,00
22-Mpentane	0,00	0,00	0,00
Benzene	0,00	0,00	0,00
24-Mpentane	0,00	0,00	0,00
Cyclohexane	0,00	0,00	0,00
223-Mbutane	0,00	0,00	0,00
33-Mpentane	0,00	0,00	0,00
11Mcycpentan	0,00	0,00	0,00
233-Mpentane	0,00	0,00	0,00
2-Mhexane	0,00	0,00	0,00
1-ci3-MCC5	0,00	0,00	0,00
3-Mhexane	0,00	0,00	0,00
1-tr3-MCC5	0,00	0,00	0,00
1-tr2-MCC5	0,00	0,00	0,00
1-Heptene	0,00	0,00	0,00
n-Heptane	0,01	0,01	0,01
Mcyclohexane	0,00	0,00	0,00
Toluene	0,00	0,00	0,00
n-Octane	0,00	0,00	0,00
n-Nonane	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00
1-Pentene	0,00	0,00	0,00
1-Hexene	0,00	0,00	0,00

Cyclopentane	0,33	0,26	0,38
--------------	------	------	------

Tab. 7-13: Zusammensetzung des Feed-Stroms von Entmethaner 2, sowie der C1-Minus und des C2-Plus Stromes in der Anlage 3 für die Betriebsstunde vom 28.04.2014 (14:00)

### 7.3 Case Studies

Komponenten	Massenstrom [kg/h]	Massenanteil [%]
Hydrogen	165	1,38
Methane	1019	8,53
Ethylene	42	0,35
Ethane	1171	9,81
Propene	77	0,65
Propane	5023	42,06
12-Butadiene	0	0,00
13-Butadiene	1	0,00
i-Butene	11	0,09
1-Butene	23	0,19
tr2-Butene	6	0,05
cis2-Butene	4	0,03
i-Butane	1751	14,67
n-Butane	1929	16,15
i-Pentane	43	0,36
n-Pentane	11	0,09
H2O	478	4,00
Nitrogen	0	0,00
CO	21	0,17

---

CO2	85	0,71
Oxygen	0	0,00
2-Mpentane	0	0,00
3-Mpentane	0	0,00
n-Hexane	30	0,25
Mcyclopentane	0	0,00
23-Mpentane	0	0,00
22-Mpentane	0	0,00
Benzene	28	0,24
24-Mpentane	0	0,00
Cyclohexane	0	0,00
223-Mbutane	3	0,02
33-Mpentane	0	0,00
11Mcycpentan	0	0,00
233-Mpentane	0	0,00
2-Mhexane	0	0,00
1-ci3-MCC5	0	0,00
3-Mhexane	0	0,00
1-tr3-MCC5	0	0,00
1-tr2-MCC5	0	0,00
1-Heptene	0	0,00
n-Heptane	17	0,15
Mcyclohexane	0	0,00
Toluene	0	0,00
n-Octane	0	0,00
n-Nonane	0	0,00
H2S	0	0,00
1-Pentene	5	0,04

1-Hexene	0	0,00
Cyclopentane	0	0,00

Tab. 7-14: Zusammensetzung des ungewaschenen Restgasstromes, Case Study 5.3.1 (Absorption von Propan)

Mittelbenzin [t/h]	Propan [gew.- %]	Propan [kg/h]
0,0	42,06	5023
2,5	42,98	4810
5,0	44,02	4564
7,5	44,83	4359
10,0	45,45	4183
12,5	45,96	4028
15,0	46,40	3886
20,0	47,19	3623
25,0	47,81	3375
30,0	48,13	3119
35,0	47,70	2836
40,0	46,00	2505

Tab. 7-15: Propangehalt im gewaschenen Restgas in Abhängigkeit von der eingesetzten Menge an Mittelbenzin zur Erstellung von Abb. 5-17 und Abb. 5-18



	0 t/h Mittel- benzin	10 t/h Mittel- benzin	20 t/h Mittel- benzin	30 t/h Mittel- benzin	40 t/h Mittel- benzin
Komponente	Massenstrom [kg/h]	Massenstrom [kg/h]	Massenstrom [kg/h]	Massenstrom [kg/h]	Massenstrom [kg/h]
Hydrogen	165	165	164	164	164
Methane	1019	1009	1001	993	986
Ethylene	42	40	39	38	37
Ethane	1171	1113	1070	1030	987
Propene	77	66	58	51	43
Propane	5023	4183	3623	3119	2505
12-Butadiene	0	0	0	0	0
13-Butadiene	1	0	0	0	0
i-Butene	11	6	3	1	0
1-Butene	23	12	7	2	0
tr2-Butene	6	3	1	0	0
cis2-Butene	4	2	1	0	0
i-Butane	1751	1046	651	314	68
n-Butane	1929	860	365	87	9
i-Pentane	43	2	0	0	0
n-Pentane	11	1	1	1	0
H2O	478	29	27	24	22
Nitrogen	0	0	0	0	0
CO	21	21	20	20	20
CO2	85	83	81	80	78
Oxygen	0	0	0	0	0
2-Mpentane	0	28	28	26	23
3-Mpentane	0	44	44	41	37

n-Hexane	30	208	207	199	184
Mcyclopentane	0	86	86	83	78
23-Mpentane	0	5	5	6	6
22-Mpentane	0	2	2	2	2
Benzene	28	21	21	20	19
24-Mpentane	0	7	7	7	7
Cyclohexane	0	53	53	52	50
223-Mbutane	3	1	1	1	1
33-Mpentane	0	1	1	1	1
11Mcycpantan	0	4	4	4	4
233-Mpentane	0	0	0	0	0
2-Mhexane	0	19	20	20	20
1-ci3-MCC5	0	7	7	7	7
3-Mhexane	0	19	20	21	21
1-tr3-MCC5	0	7	7	7	7
1-tr2-MCC5	0	13	14	14	14
1-Heptene	0	0	0	0	0
n-Heptane	17	20	21	22	23
Mcyclohexane	0	15	16	16	17
Toluene	0	4	4	5	5
n-Octane	0	0	0	0	0
n-Nonane	0	0	0	0	0
H2S	0	0	0	0	0
1-Pentene	5	0	0	0	0
1-Hexene	0	0	0	0	0
Cyclopentane	0	0	0	0	0

Tab. 7-16: Vergleich der Massenströme der reinen Komponenten des gewaschenen Restgases bei verschiedenen Mittelbenzineinsatz

	10 t/h Mittelbenzin	20 t/h Mittelbenzin	30 t/h Mittelbenzin	40 t/h Mittelbenzin
Komponente	Ausbeute [%]	Ausbeute [%]	Ausbeute [%]	Ausbeute [%]
Methan	0,95	1,74	2,48	3,24
Ethylen	3,25	5,82	8,19	10,77
Ethan	4,96	8,67	12,05	15,75
Propan	16,72	27,87	37,91	50,13
i-Buten	45,58	69,79	88,48	98,22
i-Butan	40,29	62,84	82,06	96,12
n-Butan	55,42	81,09	95,51	99,54

Tab. 7-17: Ausbeute der Komponenten in Abhängigkeit vom eingesetzten Mittelbenzin

Komponente	MG1	MG2	Strom 53	Strom 54
	[gew. %]	[gew. %]	[gew. %]	[gew. %]
Hydrogen	19,01	0,74	0,01	0,00
Methane	28,23	86,09	1,68	0,73
Ethylene	3,84	1,20	24,39	0,00
Ethane	11,84	2,57	42,64	43,40
Propene	1,14	0,02	11,29	0,01
Propane	17,72	1,07	3,41	35,52
12-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
13-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butene	0,01	0,00	0,00	0,00
1-Butene	1,28	0,00	16,46	0,01
tr2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
cis2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00

---

i-Butane	2,30	0,11	0,00	2,24
n-Butane	1,57	0,11	0,00	13,43
i-Pentane	0,60	0,01	0,00	0,12
n-Pentane	0,55	0,00	0,00	3,12
H2O	0,39	0,00	0,00	1,31
Nitrogen	3,29	5,40	0,11	0,01
CO	0,33	0,15	0,02	0,00
CO2	0,89	2,53	0,00	0,00
Oxygen	0,11	0,02	0,00	0,02
2-Mpentane	0,21	0,00	0,00	0,00
3-Mpentane	0,36	0,00	0,00	0,00
n-Hexane	1,93	0,00	0,00	0,01
Mcyclopentane	0,84	0,00	0,00	0,00
23-Mpentane	0,09	0,00	0,00	0,00
22-Mpentane	0,03	0,00	0,00	0,00
Benzene	0,21	0,00	0,00	0,00
24-Mpentane	0,08	0,00	0,00	0,00
Cyclohexane	0,60	0,00	0,00	0,00
223-Mbutane	0,01	0,00	0,00	0,00
33-Mpentane	0,02	0,00	0,00	0,00
11Mcycpenta	0,06	0,00	0,00	0,00
233-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
2-Mhexane	0,32	0,00	0,00	0,00
1-ci3-MCC5	0,11	0,00	0,00	0,00
3-Mhexane	0,34	0,00	0,00	0,00
1-tr3-MCC5	0,11	0,00	0,00	0,00
1-tr2-MCC5	0,22	0,00	0,00	0,00
1-Heptene	0,00	0,00	0,00	0,00

n-Heptane	0,44	0,00	0,00	0,00
Mycyclohexane	0,31	0,00	0,00	0,00
Toluene	0,11	0,00	0,00	0,00
n-Octane	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Nonane	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00
1-Pentene	0,50	0,00	0,00	0,00
1-Hexene	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclopentane	0,00	0,00	0,00	0,06

Tab. 7-18: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 aus der Anlage 2 und Anlage 3 für die optimierten Anlagen 16, 17, 21 und 22, Szenario 2

Komponente	MG1	MG2	Strom 53	Strom 54
	[gew. %]	[gew. %]	[gew. %]	[gew. %]
Hydrogen	20,35	1,07	0,01	0,00
Methane	23,80	84,14	1,68	0,73
Ethylene	4,13	1,73	24,39	0,00
Ethane	12,56	2,91	42,64	43,40
Propene	1,22	0,02	11,29	0,01
Propane	18,92	1,23	3,41	35,52
12-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
13-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butene	0,01	0,00	0,00	0,00
1-Butene	1,37	0,00	16,46	0,01
tr2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
cis2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butane	2,46	0,15	0,00	2,24

---

n-Butane	1,68	0,16	0,00	13,43
i-Pentane	0,65	0,01	0,00	0,12
n-Pentane	0,59	0,00	0,00	3,12
H2O	0,41	0,00	0,00	1,31
Nitrogen	3,24	5,88	0,11	0,01
CO	0,35	0,22	0,02	0,00
CO2	0,76	2,45	0,00	0,00
Oxygen	0,12	0,02	0,00	0,02
2-Mpentane	0,23	0,00	0,00	0,00
3-Mpentane	0,38	0,00	0,00	0,00
n-Hexane	2,06	0,00	0,00	0,01
Mcyclopentane	0,90	0,00	0,00	0,00
23-Mpentane	0,09	0,00	0,00	0,00
22-Mpentane	0,03	0,00	0,00	0,00
Benzene	0,23	0,00	0,00	0,00
24-Mpentane	0,09	0,00	0,00	0,00
Cyclohexane	0,64	0,00	0,00	0,00
223-Mbutane	0,01	0,00	0,00	0,00
33-Mpentane	0,02	0,00	0,00	0,00
11Mcycpentan	0,06	0,00	0,00	0,00
233-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
2-Mhexane	0,34	0,00	0,00	0,00
1-ci3-MCC5	0,12	0,00	0,00	0,00
3-Mhexane	0,36	0,00	0,00	0,00
1-tr3-MCC5	0,12	0,00	0,00	0,00
1-tr2-MCC5	0,24	0,00	0,00	0,00
1-Heptene	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Heptane	0,47	0,00	0,00	0,00

Myclohexane	0,33	0,00	0,00	0,00
Toluene	0,12	0,00	0,00	0,00
n-Octane	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Nonane	0,00	0,00	0,00	0,00
H2S	0,00	0,00	0,00	0,00
1-Pentene	0,54	0,00	0,00	0,00
1-Hexene	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclopentane	0,00	0,00	0,00	0,06

Tab. 7-19: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 aus der Anlage 2 und Anlage 3 für den Ausfall der Anlage 7

Komponente	MG1	MG2	Strom 53	Strom 54
	[gew. %]	[gew. %]	[gew. %]	[gew. %]
Hydrogen	23,49	1,52	0,01	0,00
Methane	14,86	81,49	1,68	0,73
Ethylene	4,06	2,46	24,39	0,00
Ethane	13,96	3,38	42,63	43,40
Propene	1,43	0,03	11,29	0,01
Propane	21,92	1,44	3,41	35,52
12-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
13-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butene	0,01	0,00	0,00	0,00
1-Butene	1,61	0,00	16,46	0,01
tr2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
cis2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butane	2,83	0,22	0,00	2,24
n-Butane	1,90	0,22	0,00	13,43

---

i-Pentane	0,76	0,01	0,00	0,12
n-Pentane	0,69	0,01	0,00	3,12
H2O	0,49	0,00	0,00	1,31
Nitrogen	2,32	6,54	0,11	0,01
CO	0,31	0,31	0,02	0,00
CO2	0,54	2,33	0,00	0,00
Oxygen	0,13	0,03	0,00	0,02
2-Mpentane	0,27	0,00	0,00	0,00
3-Mpentane	0,45	0,00	0,00	0,00
n-Hexane	2,43	0,00	0,00	0,01
Mcyclopentane	1,06	0,00	0,00	0,00
23-Mpentane	0,11	0,00	0,00	0,00
22-Mpentane	0,03	0,00	0,00	0,00
Benzene	0,27	0,00	0,00	0,00
24-Mpentane	0,10	0,00	0,00	0,00
Cyclohexane	0,75	0,00	0,00	0,00
223-Mbutane	0,01	0,00	0,00	0,00
33-Mpentane	0,02	0,00	0,00	0,00
11Mcycpantan	0,07	0,00	0,00	0,00
233-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
2-Mhexane	0,40	0,00	0,00	0,00
1-ci3-MCC5	0,14	0,00	0,00	0,00
3-Mhexane	0,43	0,00	0,00	0,00
1-tr3-MCC5	0,14	0,00	0,00	0,00
1-tr2-MCC5	0,28	0,00	0,00	0,00
1-Heptene	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Heptane	0,55	0,00	0,00	0,00
Mcyclohexane	0,39	0,00	0,00	0,00



Toluene	0,14	0,00	0,00	0,00
n-Octane	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Nonane	0,00	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub> S	0,00	0,00	0,00	0,00
1-Pentene	0,63	0,00	0,00	0,00
1-Hexene	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclopentane	0,00	0,01	0,00	0,06

Tab. 7-20: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 aus der Anlage 2 und Anlage 3 für den Ausfall der Anlagen 16, 17, 21 und 22

Komponente	MG1	MG2	Strom 53	Strom 54
	[gew. %]	[gew. %]	[gew. %]	[gew. %]
Hydrogen	38,80	1,12	0,01	0,00
Methane	15,01	83,50	1,81	0,65
Ethylene	6,30	1,65	24,56	0,00
Ethane	15,44	3,62	42,55	60,05
Propene	2,33	0,32	11,21	0,00
Propane	7,34	1,27	3,38	29,13
12-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
13-Butadiene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
1-Butene	3,18	0,45	16,33	0,00
tr2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
cis2-Butene	0,00	0,00	0,00	0,00
i-Butane	1,28	0,15	0,00	0,00
n-Butane	2,12	0,17	0,00	7,45

---

i-Pentane	1,29	0,02	0,00	0,00
n-Pentane	1,17	0,02	0,00	1,33
H2O	0,05	0,00	0,00	1,39
Nitrogen	2,67	5,07	0,13	0,00
CO	0,28	0,13	0,02	0,00
CO2	0,38	2,46	0,00	0,00
Oxygen	0,24	0,01	0,00	0,00
2-Mpentane	0,04	0,00	0,00	0,00
3-Mpentane	0,06	0,00	0,00	0,00
n-Hexane	0,34	0,01	0,00	0,00
Mcyclopentane	0,15	0,00	0,00	0,00
23-Mpentane	0,02	0,00	0,00	0,00
22-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
Benzene	0,04	0,00	0,00	0,00
24-Mpentane	0,01	0,00	0,00	0,00
Cyclohexane	0,10	0,00	0,00	0,00
223-Mbutane	0,00	0,00	0,00	0,00
33-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
11Mcycpentan	0,01	0,00	0,00	0,00
233-Mpentane	0,00	0,00	0,00	0,00
2-Mhexane	0,06	0,00	0,00	0,00
1-ci3-MCC5	0,02	0,00	0,00	0,00
3-Mhexane	0,06	0,00	0,00	0,00
1-tr3-MCC5	0,02	0,00	0,00	0,00
1-tr2-MCC5	0,04	0,00	0,00	0,00
1-Heptene	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Heptane	0,08	0,00	0,00	0,00
Mcyclohexane	0,05	0,00	0,00	0,00

---

Toluene	0,02	0,00	0,00	0,00
n-Octane	0,00	0,00	0,00	0,00
n-Nonane	0,00	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub> S	0,00	0,00	0,00	0,00
1-Pentene	1,01	0,01	0,00	0,00
1-Hexene	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclopentane	0,00	0,00	0,00	0,00

---

Tab. 7-21: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 aus der Anlage 2 und Anlage 3 für den Ausnahmebetrieb

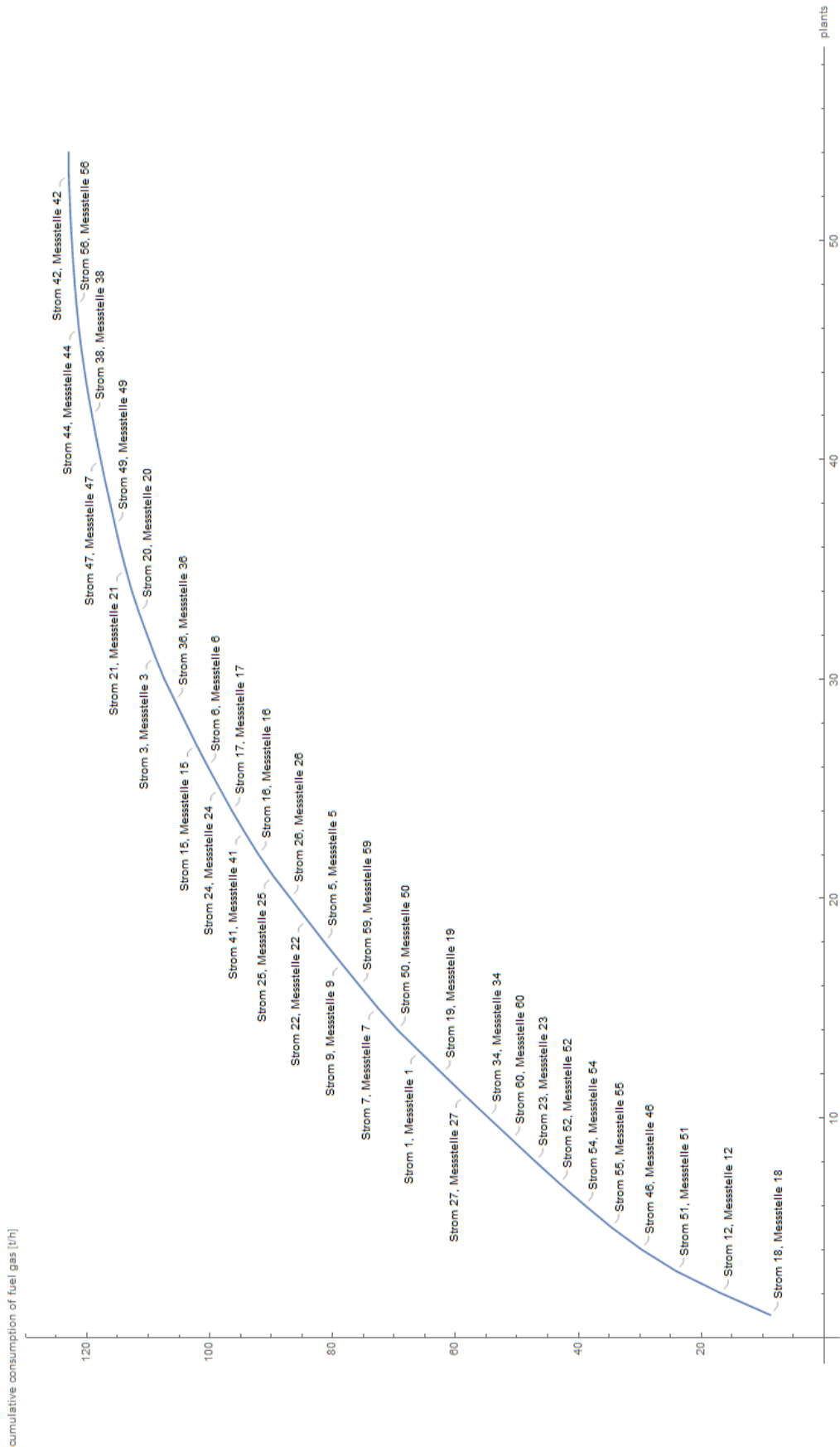


Abb. 7-36: grafische Darstellung der ABC-Analyse für den durchschnittlichen Verbrauch der Anlagen im Betrieb vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00)

Anlage	Mischgasverbrauch [t/h]	Mischgasverbrauch, relativ [%]
Strom 18, Messstelle 18	8,788	7,146
Strom 12, Messstelle 12	8,061	6,555
Strom 51, Messstelle 51	7,243	5,889
Strom 46, Messstelle 46	5,713	4,646
Strom 55, Messstelle 55	4,847	3,942
Strom 54, Messstelle 54	4,310	3,504
Strom 52, Messstelle 52	4,124	3,353
Strom 23, Messstelle 23	3,942	3,206
Strom 60, Messstelle 60	3,821	3,107
Strom 34, Messstelle 34	3,813	3,100
Strom 27, Messstelle 27	3,794	3,085
Strom 19, Messstelle 19	3,690	3,000
Strom 1, Messstelle 1	3,668	2,982
Strom 50, Messstelle 50	3,657	2,974
Strom 7, Messstelle 7	3,183	2,588
Strom 59, Messstelle 59	2,941	2,392
Strom 9, Messstelle 9	2,899	2,357
Strom 5, Messstelle 5	2,868	2,332
Strom 22, Messstelle 22	2,775	2,257
Strom 26, Messstelle 26	2,756	2,241
Strom 25, Messstelle 25	2,744	2,232
Strom 16, Messstelle 16	2,467	2,006
Strom 41, Messstelle 41	2,218	1,803
Strom 17, Messstelle 17	2,108	1,714
Strom 24, Messstelle 24	1,965	1,598

---

Strom 6, Messstelle 6	1,935	1,574
Strom 15, Messstelle 15	1,859	1,512
Strom 58, Messstelle 58	1,757	1,428
Strom 36, Messstelle 36	1,743	1,418
Strom 2, Messstelle 2	1,737	1,413
Strom 3, Messstelle 3	1,467	1,193
Strom 35, Messstelle 35	1,316	1,070
Strom 20, Messstelle 20	1,290	1,049
Strom 57, Messstelle 57	1,194	0,971
Strom 21, Messstelle 21	0,996	0,810
Strom 14, Messstelle 14	0,925	0,752
Strom 49, Messstelle 49	0,812	0,660
Strom 53, Messstelle 53	0,809	0,657
Strom 40, Messstelle 40	0,797	0,648
Strom 47, Messstelle 47	0,746	0,607
Strom 11, Messstelle 11	0,720	0,585
Strom 38, Messstelle 38	0,673	0,547
Strom 37, Messstelle 37	0,654	0,532
Strom 39, Messstelle 39	0,556	0,452
Strom 13, Messstelle 13	0,520	0,423
Strom 44, Messstelle 44	0,438	0,356
Strom 56, Messstelle 56	0,352	0,286
Strom 45, Messstelle 45	0,303	0,246
Strom 48, Messstelle 48	0,266	0,217
Strom 8, Messstelle 8	0,214	0,174
Strom 10, Messstelle 10	0,204	0,166
Strom 43, Messstelle 43	0,152	0,124
Strom 42, Messstelle 42	0,141	0,115

---

Strom 4, Messstelle 4	0,008	0,006
-----------------------	-------	-------

---

Tab. 7-22: Durchschnittlicher Verbrauch der Anlagen im Betrieb vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) (sortiert mithilfe einer ABC-Analyse)

	Anlagen	gesamter, relativer Mischgasverbrauch [%]
Gruppe A	Strom 18, Messstelle 18	28,177
	Strom 12, Messstelle 12	
	Strom 51, Messstelle 51	
	Strom 46, Messstelle 46	
	Strom 55, Messstelle 55	
Gruppe B	Strom 54, Messstelle 54	42,479
	Strom 52, Messstelle 52	
	Strom 23, Messstelle 23	
	Strom 60, Messstelle 60	
	Strom 34, Messstelle 34	
	Strom 27, Messstelle 27	
	Strom 19, Messstelle 19	
	Strom 1, Messstelle 1	
	Strom 50, Messstelle 50	
	Strom 7, Messstelle 7	
	Strom 59, Messstelle 59	
	Strom 9, Messstelle 9	
	Strom 5, Messstelle 5	
	Strom 22, Messstelle 22	
Strom 26, Messstelle 26		
Gruppe C	Strom 25, Messstelle 25	29,344

Strom 16, Messstelle 16

Strom 41, Messstelle 41

Strom 17, Messstelle 17

Strom 24, Messstelle 24

Strom 6, Messstelle 6

Strom 15, Messstelle 15

Strom 58, Messstelle 58

Strom 36, Messstelle 36

Strom 2, Messstelle 2

Strom 3, Messstelle 3

Strom 35, Messstelle 35

Strom 20, Messstelle 20

Strom 57, Messstelle 57

Strom 21, Messstelle 21

Strom 14, Messstelle 14

Strom 49, Messstelle 49

Strom 53, Messstelle 53

Strom 40, Messstelle 40

Strom 47, Messstelle 47

Strom 11, Messstelle 11

Strom 38, Messstelle 38

Strom 37, Messstelle 37

Strom 39, Messstelle 39

Strom 13, Messstelle 13

Strom 44, Messstelle 44

Strom 56, Messstelle 56

Strom 45, Messstelle 45

Strom 48, Messstelle 48



Strom 8, Messstelle 8

Strom 10, Messstelle 10

Strom 43, Messstelle 43

Strom 42, Messstelle 42

Strom 4, Messstelle 4

---

Tab. 7-23: Zusammenfassung der Anlagen in Gruppe A (hohe Priorität), Gruppe B („mittlere Priorität“) und Gruppe C („niedrige Priorität“) bei einer jeweils oberen Schranke von 30 % für Gruppe A und Gruppe C über den durchschnittlichen Mischgasverbrauch (t/h) vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00)

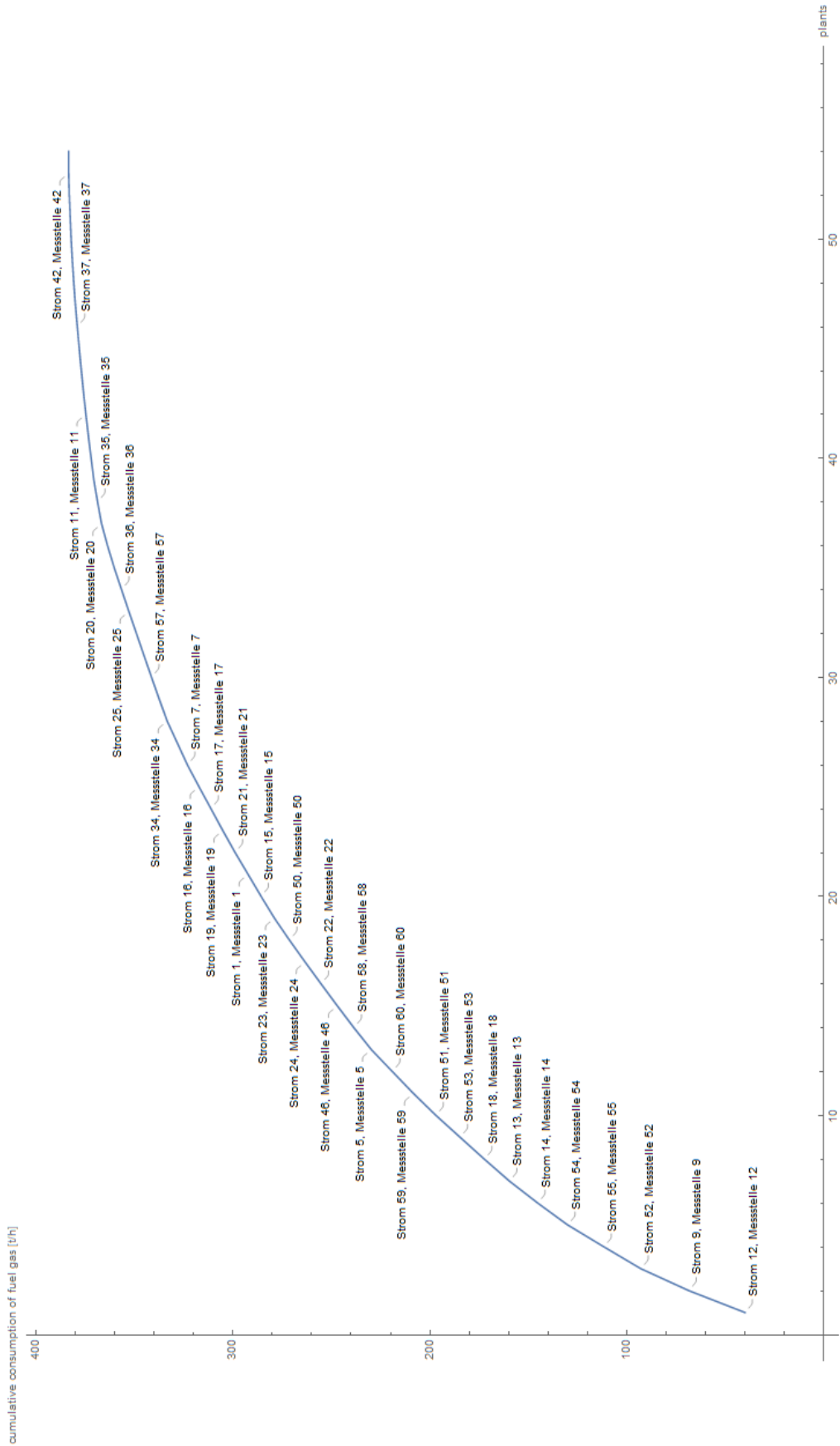


Abb. 7-37: grafische Darstellung der ABC-Analyse für den maximalen Verbrauch der Anlagen im Betrieb vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00)

Anlage	Mischgasverbrauch [t/h]	Mischgasverbrauch, relativ [%]
Strom 12, Messstelle 12	39,856	10,389
Strom 9, Messstelle 9	28,569	7,447
Strom 52, Messstelle 52	24,363	6,351
Strom 55, Messstelle 55	18,812	4,904
Strom 54, Messstelle 54	18,401	4,797
Strom 14, Messstelle 14	15,239	3,972
Strom 13, Messstelle 13	14,350	3,740
Strom 18, Messstelle 18	12,720	3,316
Strom 53, Messstelle 53	12,338	3,216
Strom 51, Messstelle 51	12,318	3,211
Strom 59, Messstelle 59	11,399	2,971
Strom 60, Messstelle 60	10,742	2,800
Strom 5, Messstelle 5	10,649	2,776
Strom 58, Messstelle 58	8,876	2,314
Strom 46, Messstelle 46	8,449	2,202
Strom 22, Messstelle 22	8,233	2,146
Strom 24, Messstelle 24	8,138	2,121
Strom 50, Messstelle 50	7,961	2,075
Strom 23, Messstelle 23	7,627	1,988
Strom 15, Messstelle 15	6,800	1,773
Strom 1, Messstelle 1	6,607	1,722
Strom 21, Messstelle 21	6,591	1,718
Strom 19, Messstelle 19	6,240	1,627
Strom 17, Messstelle 17	6,048	1,576
Strom 16, Messstelle 16	6,044	1,575

---

Strom 7, Messstelle 7	5,917	1,542
Strom 27, Messstelle 27	5,132	1,338
Strom 34, Messstelle 34	5,132	1,338
Strom 6, Messstelle 6	4,049	1,056
Strom 57, Messstelle 57	3,917	1,021
Strom 2, Messstelle 2	3,860	1,006
Strom 26, Messstelle 26	3,819	0,995
Strom 25, Messstelle 25	3,818	0,995
Strom 36, Messstelle 36	3,740	0,975
Strom 41, Messstelle 41	3,713	0,968
Strom 3, Messstelle 3	3,377	0,880
Strom 20, Messstelle 20	3,030	0,790
Strom 35, Messstelle 35	2,068	0,539
Strom 56, Messstelle 56	1,880	0,490
Strom 39, Messstelle 39	1,381	0,360
Strom 47, Messstelle 47	1,379	0,359
Strom 11, Messstelle 11	1,274	0,332
Strom 38, Messstelle 38	1,233	0,321
Strom 40, Messstelle 40	1,102	0,287
Strom 48, Messstelle 48	1,034	0,270
Strom 37, Messstelle 37	1,004	0,262
Strom 49, Messstelle 49	0,971	0,253
Strom 10, Messstelle 10	0,822	0,214
Strom 44, Messstelle 44	0,704	0,184
Strom 8, Messstelle 8	0,626	0,163
Strom 45, Messstelle 45	0,478	0,125
Strom 43, Messstelle 43	0,477	0,124
Strom 42, Messstelle 42	0,314	0,082

---

Strom 4, Messstelle 4                      0,012                      0,003

---

Tab. 7-24: Maximaler Verbrauch der Anlagen im Betrieb vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) (sortiert mithilfe einer ABC-Analyse)

	Anlage	gesamter, relativer Mischgasverbrauch [%]
Gruppe A	Strom 12, Messstelle 12	29,090
	Strom 9, Messstelle 9	
	Strom 52, Messstelle 52	
	Strom 55, Messstelle 55	
Gruppe B	Strom 54, Messstelle 54	41,658
	Strom 14, Messstelle 14	
	Strom 13, Messstelle 13	
	Strom 18, Messstelle 18	
	Strom 53, Messstelle 53	
	Strom 51, Messstelle 51	
	Strom 59, Messstelle 59	
	Strom 60, Messstelle 60	
	Strom 5, Messstelle 5	
	Strom 58, Messstelle 58	
	Strom 46, Messstelle 46	
	Strom 22, Messstelle 22	
	Strom 24, Messstelle 24	
	Strom 50, Messstelle 50	
Gruppe C	Strom 23, Messstelle 23	29,252
	Strom 15, Messstelle 15	
	Strom 1, Messstelle 1	
	Strom 21, Messstelle 21	

Strom 19, Messstelle 19  
Strom 17, Messstelle 17  
Strom 16, Messstelle 16  
Strom 7, Messstelle 7  
Strom 27, Messstelle 27  
Strom 34, Messstelle 34  
Strom 6, Messstelle 6  
Strom 57, Messstelle 57  
Strom 2, Messstelle 2  
Strom 26, Messstelle 26  
Strom 25, Messstelle 25  
Strom 36, Messstelle 36  
Strom 41, Messstelle 41  
Strom 3, Messstelle 3  
Strom 20, Messstelle 20  
Strom 35, Messstelle 35  
Strom 56, Messstelle 56  
Strom 39, Messstelle 39  
Strom 47, Messstelle 47  
Strom 11, Messstelle 11  
Strom 38, Messstelle 38  
Strom 40, Messstelle 40  
Strom 48, Messstelle 48  
Strom 37, Messstelle 37  
Strom 49, Messstelle 49  
Strom 10, Messstelle 10  
Strom 44, Messstelle 44  
Strom 8, Messstelle 8

Strom 45, Messstelle 45

Strom 43, Messstelle 43

Strom 42, Messstelle 42

Strom 4, Messstelle 4

---

Tab. 7-25: Zusammenfassung der Anlagen in Gruppe A (hohe Priorität), Gruppe B („mittlere Priorität“) und Gruppe C („niedrige Priorität“) bei einer jeweils oberen Schranke von 30 % für Gruppe A und Gruppe C über den maximalen Mischgasverbrauch (t/h) vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00)

## 7.4 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: schematische Darstellung des Fackelgasnetzwerkes. Ein Teil des Fackelgases wird durch Kompressoren verdichtet und dem Rest- und Mischgassystem zugeführt. Das restliche Gas wird zum Fackelfeld geführt und verbrannt. ....	5
Abb. 4-1: Wahl der Zustandsgleichung (Fluid Package).....	12
Abb. 4-2: Grundsätzlicher Aufbau des Modells.....	13
Abb. 4-3: Auswahl der Korrelation zur Berechnung des Druckverlustes durch die Rohrströmung.....	13
Abb. 4-4: Auswahl der Korrelation zur Berechnung des Wärmeverlustes am Rohr...	14
Abb. 4-5: Mischgasschiene 1 – alle Rest- und Erdgasströme wurden an einem Punkt gemischt .....	17
Abb. 4-6: Mischgasschiene 2 – alle Rest- und Erdgasströme wurden an einem Punkt gemischt .....	17
Abb. 5-1: Vergleich der Histogramme der Eingangsströme.....	21
Abb. 5-2: Vergleich der Histogramme der Ausgangsströme aus Szenario 1 und 2...	22
Abb. 5-3: Vergleich der Histogramme der Ausgangsströme aus Szenario 3 und 4...	22
Abb. 5-4: Histogramm der absoluten Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 1h-Werten.....	24
Abb. 5-5: Histogramm der relativen Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 1h-Werten.....	24
Abb. 5-6: Histogramm der Summe aller Eingangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 1h-Werten .....	25
Abb. 5-7: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 1h-Werten .....	25
Abb. 5-8: Histogramm der absoluten Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 12min-Werten .....	26
Abb. 5-9: Histogramm der relativen Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 12min-Werten .....	26
Abb. 5-10: Histogramm der Summe aller Eingangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 12min-Werten .....	27
Abb. 5-11: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 12min-Werten .....	27
Abb. 5-12: Histogramm der absoluten Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 6min-Werten.....	28
Abb. 5-13: Histogramm der relativen Fehler von Szenario 4 unter Verwendung von 6min-Werten .....	28
Abb. 5-14: Histogramm der Summe aller Eingangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 6min-Werten .....	29
Abb. 5-15: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme von Szenario 4 unter Verwendung von 6min-Werten .....	29
Abb. 5-16: statische Simulation der Waschkolonne 1 zur Analyse des Absorptionsverhaltens von Propan bei variablen Mittelbenzinzufuhr.....	33
Abb. 5-17: Propangehalt im gewaschenen Restgas in Abhängigkeit von der eingesetzten Menge an Mittelbenzin .....	34
Abb. 5-18: Massenstrom von Propan im gewaschenen Restgas in Abhängigkeit von der eingesetzten Menge an Mittelbenzin .....	35
Abb. 5-19: Ausbeuten ausgewählter Substanzen in Kolonne 1 .....	36
Abb. 5-20: Screenshot der statischen Simulation des Methanolreaktors.....	41
Abb. 7-1: Zusammensetzung von Strom 67 .....	47



Abb. 7-2: Gesamtbilanz Szenario 1 .....	47
Abb. 7-3: Gesamtbilanz Szenario 2 .....	48
Abb. 7-4: Gesamtbilanz Szenario 3 .....	48
Abb. 7-5: Gesamtbilanz Szenario 4 .....	49
Abb. 7-6: Gesamtbilanz Szenario 5 .....	49
Abb. 7-7: Gesamtbilanz Szenario 6 .....	50
Abb. 7-8: Gesamtbilanz Szenario 7 .....	50
Abb. 7-9: Gesamtbilanz Szenario 8 .....	51
Abb. 7-10: Histogramm der Summe aller Eingangsströme der eigenen Bilanz .....	59
Abb. 7-11: Histogramm der Summe aller Eingangsströme der gegebenen Bilanz .....	59
Abb. 7-12: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme mit den Mischgasschienen unter Berücksichtigung vom Fackelgas .....	60
Abb. 7-13: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme mit den Endverbrauchern unter Berücksichtigung vom Fackelgas .....	60
Abb. 7-14: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme mit den Mischgasschienen ohne Berücksichtigung vom Fackelgas .....	61
Abb. 7-15: Histogramm der Summe aller Ausgangsströme mit den Endverbrauchern ohne Berücksichtigung vom Fackelgas .....	61
Abb. 7-16: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 1 .....	62
Abb. 7-17: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 2 .....	62
Abb. 7-18: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 3 .....	63
Abb. 7-19: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 4 .....	63
Abb. 7-20: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 5 .....	64
Abb. 7-21: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 6 .....	64
Abb. 7-22: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 7 .....	65
Abb. 7-23: Histogramm der absoluten Fehler, Szenario 8 .....	65
Abb. 7-24: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 1 .....	66
Abb. 7-25: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 2 .....	66
Abb. 7-26: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 3 .....	67
Abb. 7-27: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 4 .....	67
Abb. 7-28: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 5 .....	68
Abb. 7-29: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 6 .....	68
Abb. 7-30: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 7 .....	69
Abb. 7-31: Histogramm der relativen Fehler, Szenario 8 .....	69
Abb. 7-32: Vergleich der Histogramme (absoluter Fehler) .....	70
Abb. 7-33: Vergleich der Histogramme (relativer Fehler) .....	70
Abb. 7-34: grafische Darstellung der ABC-Analyse über den Mischgasverbrauch (t/h) für den 28.04.2014, 14:00 .....	71
Abb. 7-35: grafische Darstellung der ABC-Analyse der Betriebsstunden vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) .....	77
Abb. 7-36: grafische Darstellung der ABC-Analyse für den durchschnittlichen Verbrauch der Anlagen im Betrieb vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) .....	102
Abb. 7-37: grafische Darstellung der ABC-Analyse für den maximalen Verbrauch der Anlagen im Betrieb vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) .....	108

## 7.5 Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Bilanzierungsszenarien .....	9
Tab. 5-1: Ergebnisse der Szenarien 1 - 4.....	20
Tab. 5-2: Ergebnisse der Szenarien 5 – 8.....	20
Tab. 5-3: Ergebnisse von Szenario 4 für 1 h-, 12 min- und 6 min-Werte.....	23
Tab. 5-4: Gegenüberstellung der simulierten Massenströme zu den gemessenen Massenströmen am 28.04.2014 (14:00).....	31
Tab. 5-5: Bilanzierungsergebnisse aus dem Spreadsheet für den 28.04.2014 (14:00) .....	31
Tab. 5-6: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell vom 28.04.2014 (14:00) .....	32
Tab. 5-7: Bilanzierungsergebnisse aus dem Spreadsheet für die optimierten Ströme 16, 17, 21 und 22, Szenario 2.....	37
Tab. 5-8: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell der optimierten Ströme 16, 17, 21 und 22, Szenario 2 .....	37
Tab. 5-9: Bilanzierungsergebnis aus dem Spreadsheet für den Ausfall der Anlage 7 .....	38
Tab. 5-10: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell für den Ausfall der Anlage 7 .....	39
Tab. 5-11: Bilanzierungsergebnisse aus dem Spreadsheet für den Ausfall der Ströme 16, 17, 21 und 22.....	39
Tab. 5-12: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell für den Ausfall der Ströme 16, 17, 21 und 22 .....	40
Tab. 5-13: Bilanzierungsergebnisse aus dem Spreadsheet für den Ausnahmebetrieb .....	43
Tab. 5-14: Zustandsgrößen ausgewählter Ströme aus dem Modell für den Ausnahmebetrieb .....	43
Tab. 7-1: Tabellarische Auflistung der Eingangsströme der eigenen Bilanz. Die orange markierten Messtellen werden im Modell als „Strom 67“ zusammengefasst ..	52
Tab. 7-2: Tabellarische Auflistung der Eingangsströme der gegebenen Bilanz. Die orange markierten Messstellen werden im Modell als „Strom 67“ zusammengefasst ..	54
Tab. 7-3: Tabellarische Auflistung der Ausgangsströme mit Berücksichtigung des Fackelgases. Die blau markierten Messstellen sind die Mischgasschienen, von denen aus die meisten Heizgasverbraucher in der Raffinerie mit Mischgas versorgt werden.....	55
Tab. 7-4: Tabellarische Auflistung der Ausgangsströme ohne Berücksichtigung des Fackelgases. Die blau markierten Messstellen sind die Mischgasschienen, von denen aus die meisten Heizgasverbraucher in der Raffinerie mit Mischgas versorgt werden.....	55
Tab. 7-5: Tabellarische Auflistung der Ausgangsströme mit Berücksichtigung des Fackelgases. Die blau markierten Messstellen sind die Heizgasverbraucher, die von den Mischgasschienen mit Heizgas versorgt werden.....	57
Tab. 7-6: Tabellarische Auflistung der Ausgangsströme ohne Berücksichtigung des Fackelgases. Die blau markierten Messstellen sind die Heizgasverbraucher, die von den Mischgasschienen mit Heizgas versorgt werden.....	58
Tab. 7-7: tabellarische Darstellung der ABC-Analyse über die Ein- und Ausgangsströme (t/h) für den 28.04.2014, 14:00 .....	74
Tab. 7-8: Zusammenfassung der Anlagen in Gruppe A (hohe Priorität), Gruppe B („mittlere Priorität“) und Gruppe C („niedrige Priorität“) bei einer jeweils oberen	

Schranke von 30 % für Gruppe A und Gruppe C über den Mischgasverbrauch (t/h) für den 28.04.2014, 14:00.....	76
Tab. 7-9: tabellarische Darstellung der ABC-Analyse der Betriebsstunden vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00). Die orange markierten Messstellen wurden bei der Bestimmung der Betriebsstunde 02.05.2014 (22:00) vernachlässigt. ....	80
Tab. 7-10: Zusammenfassung der Anlagen in Gruppe A (hohe Priorität), Gruppe B („mittlere Priorität“) und Gruppe C („niedrige Priorität“) bei einer jeweils oberen Schranke von 30 % für Gruppe A und Gruppe C der Betriebsstunden vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00). Die orange markierten Messstellen wurden bei der Bestimmung der Betriebsstunde 02.05.2014 (22:00) vernachlässigt. ....	82
Tab. 7-11: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 für die Betriebsstunde vom 28.04.2014 (14:00) .....	84
Tab. 7-12: Zusammensetzung der Feed-Ströme von Entmethaner 1, sowie der C1-Minus und des C2-Plus Stromes in Anlage 2 für die Betriebsstunde vom 28.04.2014 (14:00) .....	86
Tab. 7-13: Zusammensetzung des Feed-Stroms von Entmethaner 2, sowie der C1-Minus und des C2-Plus Stromes in der Anlage 3 für die Betriebsstunde vom 28.04.2014 (14:00) .....	88
Tab. 7-14: Zusammensetzung des ungewaschenen Restgasstromes, Case Study 5.3.1 (Absorption von Propan).....	90
Tab. 7-15: Propangehalt im gewaschenen Restgas in Abhängigkeit von der eingesetzten Menge an Mittelbenzin zur Erstellung von Abb. 5-17 und Abb. 5-18....	90
Tab. 7-16: Vergleich der Massenströme der reinen Komponenten des gewaschenen Restgases bei verschiedenen Mittelbenzineinsatz .....	92
Tab. 7-17: Ausbeute der Komponenten in Abhängigkeit vom eingesetzten Mittelbenzin .....	93
Tab. 7-18: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 aus der Anlage 2 und Anlage 3 für die optimierten Anlagen 16, 17, 21 und 22, Szenario 2 .....	95
Tab. 7-19: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 aus der Anlage 2 und Anlage 3 für den Ausfall der Anlage 7.....	97
Tab. 7-20: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 aus der Anlage 2 und Anlage 3 für den Ausfall der Anlagen 16, 17, 21 und 22.....	99
Tab. 7-21: Zusammensetzung der Heizgase in Mischgasschiene 1 und 2, sowie der Ströme 53 und 54 aus der Anlage 2 und Anlage 3 für den Ausnahmebetrieb .....	101
Tab. 7-22: Durchschnittlicher Verbrauch der Anlagen im Betrieb vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) (sortiert mithilfe einer ABC-Analyse).....	105
Tab. 7-23: Zusammenfassung der Anlagen in Gruppe A (hohe Priorität), Gruppe B („mittlere Priorität“) und Gruppe C („niedrige Priorität“) bei einer jeweils oberen Schranke von 30 % für Gruppe A und Gruppe C über den durchschnittlichen Mischgasverbrauch (t/h) vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) .....	107
Tab. 7-24: Maximaler Verbrauch der Anlagen im Betrieb vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) (sortiert mithilfe einer ABC-Analyse) .....	111
Tab. 7-25: Zusammenfassung der Anlagen in Gruppe A (hohe Priorität), Gruppe B („mittlere Priorität“) und Gruppe C („niedrige Priorität“) bei einer jeweils oberen Schranke von 30 % für Gruppe A und Gruppe C über den maximalen Mischgasverbrauch (t/h) vom 01.01.2012 (00:00) bis 31.12.2017 (23:00) .....	113

## Literaturverzeichnis

- [1] F. Pöllabauer, “Energetische Optimierung vernetzter Anlagen am Beispiel einer Raffinerie Energetische Optimierung vernetzter Anlagen am Beispiel einer Raffinerie,” TU Graz, 2015.
- [2] A. Wollrab, *Organische Chemie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] C. E. Mortimer and U. Müller, Eds., *Chemie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2010.
- [4] G. Ertl, H. Knzinger, and J. Weitkamp, Eds., *Handbook of Heterogeneous Catalysis*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1997.
- [5] R. H. Perry and D. W. Green, *Perry’s Chemical Engineers’ Handbook*. New York, McGraw-Hill, 2008.
- [6] C. Lüdecke and D. Lüdecke, *Thermodynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [7] J. Tausendschön, “Simulationsgestützte Bewertung der Versorgungssicherheit von hochgradig vernetzten Industrieanlagen,” TU Graz, 2017.
- [8] M. Eschlböck, “Modellierung und Optimierung des Strombedarfs hochgradig vernetzter Industrieanlagen,” TU Graz, 2017.
- [9] J. Cordts and H.-J. Lensing, *ABC-Analyse. Preisanalyse für Einkäufer*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1992.
- [10] O. J. Tomaschitz, “Case Studies für die alternative Energieversorgung hochgradig vernetzter Produktionsanlagen,” TU Graz, 2018.
- [11] G. Bozzano and F. Manenti, “Efficient methanol synthesis: Perspectives, technologies and optimization strategies,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 56, pp. 71–105, 2016.