

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM



Lehrstuhl für  
Fluidverfahrenstechnik

## Entwicklung und energetische Bewertung einer thermischen Trennsequenz zur Integration eines Styrol-Rezyklatstroms in die industrielle Polystyrolherstellung

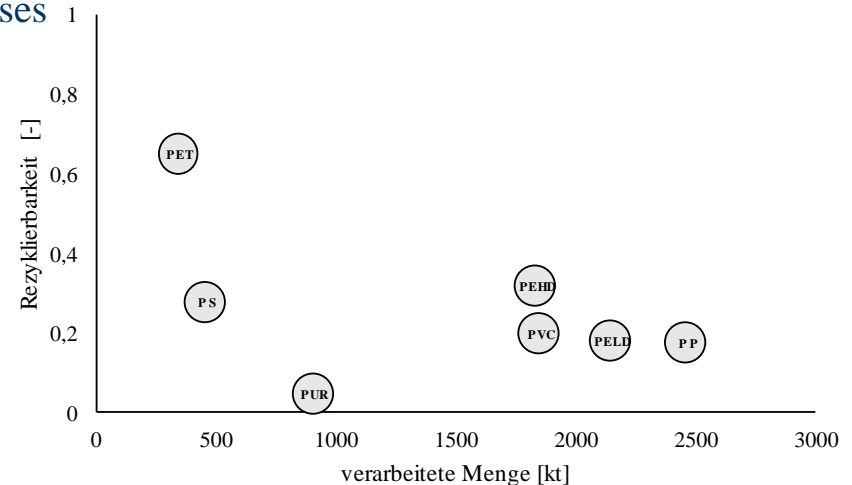
Amelie Merkel, Marcus Grünewald, Philip Biessey

# Motivation

# Motivation

## Realisierung von rohstofflichen Kunststoffrecyclingtechnologien

- Entwicklung und energetische Bewertung eines Prozesses
- Hier: Pyrolyse von Polystyrol (PS)
- PS = Massenkunststoff
  - Verpackungsmaterial für Lebensmittel, Kaffee, Kosmetikartikel und Spielzeuge
  - Hohes Potential rohstofflich recycelt zu werden



- **1. Trennsequenzentwicklung** mit Aspen Plus®: 99,6 % Styrol
- **2. Energetische Bewertung** hinsichtlich der konventionellen Produktion von PS und anderer Verwertungsmethoden

# Trennsequenzentwicklung

# Pyrolyse von Polystyrol

## Verfahren nach Kaminsky et al. 2004

- Input: virgin Polystyrol (= Standard-PS, Reinstoff)
- Thermische Spaltung der Polymerketten im Wirbelschichtreaktor
- Output: Koks, Pyrolyse-Gas & -Öl

Rezyklatstrom

Monoaromaten:

Diphenyle:

Styrol:

Leichtsieder & Mittelsieder (Styrol)

Schwersieder

78,12 wt%

- Ergebnis: Komponentenliste des Rezyklatstroms
  - Liste mit 59 bekannten und unbekanntem Komponenten

# Reduzierung der Komponentenliste

## Wahl der Gruppierungskriterien

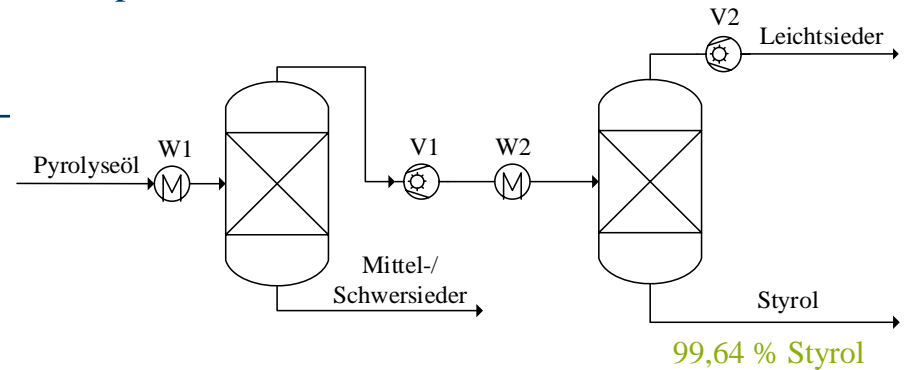
- Wahl des Stoffdatenmodells: Peng-Robinson
    - Entscheidungsbaum, Anwendungsbereich: Styrolherstellung
  - Siedetemperaturen (unbekannte Komponenten)
  - Dampfdrücke
  - azentrische Faktoren  $\omega$
  - WW-Parameter  $k_{ij}$
- Pyrolyse-Öl = instabile Suspension
- **Feststoffanteil**
    - Abtrennung mittels Sedimentation
    - Aspen Plus: Component separator
  - **Instabilität**
    - Hemmung durch Inhibitorzugabe
      - 4-tert-Butylcatechol (TBC) und Sauerstoff

# Entwicklung der Trennsequenz

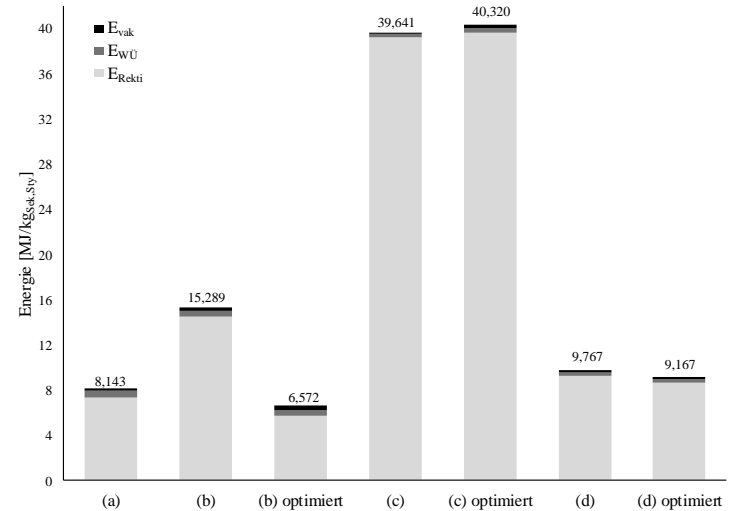
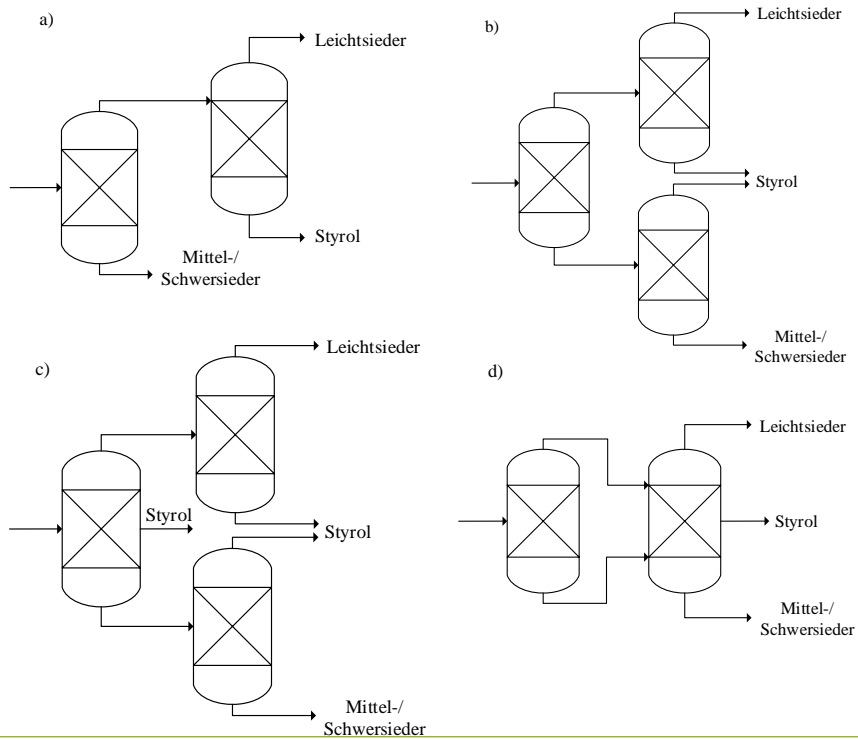
- Wahl der Trennoperationen nach der Literatur und Stand der Technik
  - Liu et al. 2000, ResolVe
  - Styroldestillation: innerhalb der Styrolherstellung
- Trennung der Komponenten Ethylbenzol und Alpha-Methylstyrol in 2 Trennschritten
  - Mit den relevanten Massenströmen und den Siedetemperaturen

	T °C	p bar	$n_{St}$ –	$n_{Feed}$ –	v –	u –
1. Rektifikation	75,3	0,107	32	22	5	0,89
2. Rektifikation	72,9	0,107	88	43	35	0,09

v: Rücklaufverhältnis u: Destillat/Feed-Verhältnis



# Generierung von Prozessalternativen



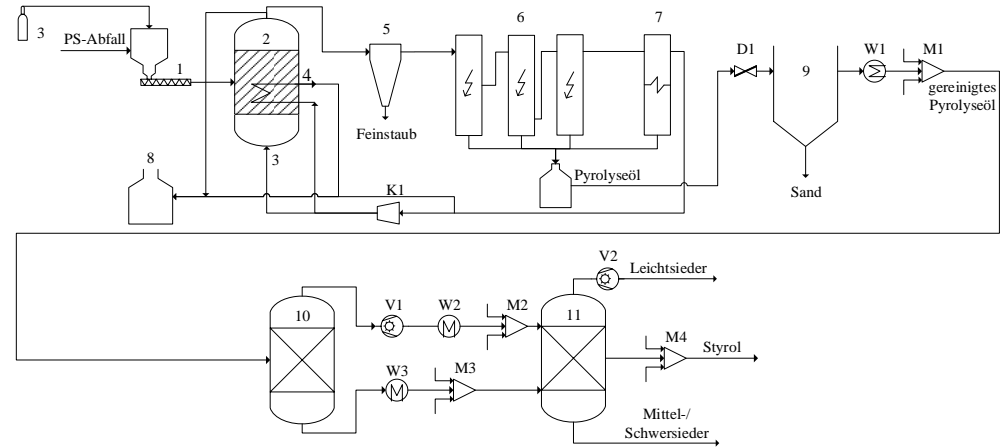
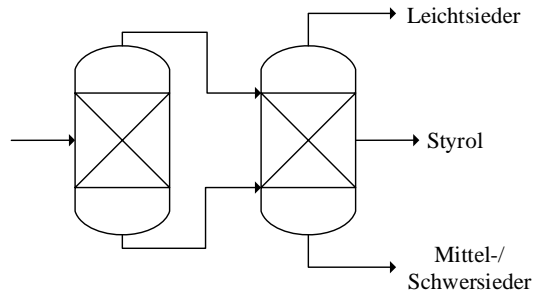
- Ziel: geringer und „robuster“ Energieverbrauch  
 → Prozessvariante d)



# Wahl der Prozessalternative

## Prozessflussbild: Pyrolyse, mechanische Aufbereitung, Trennung

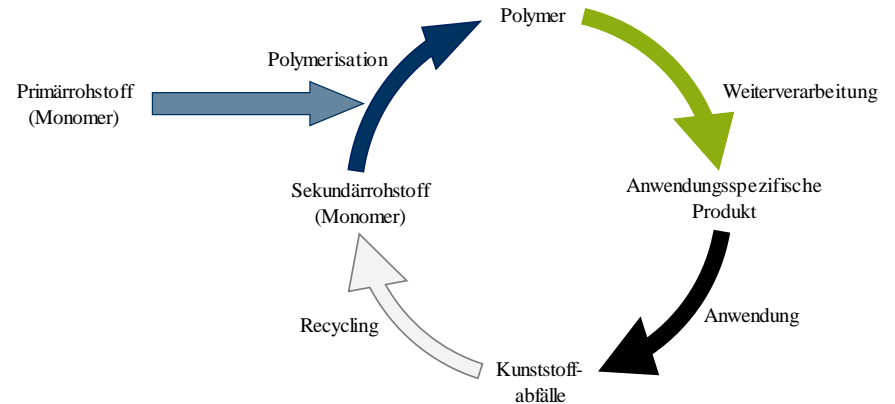
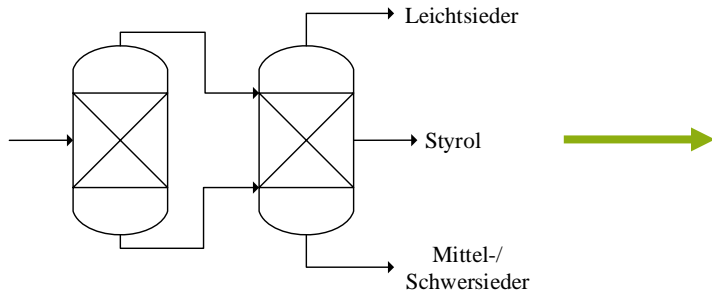
	T °C	p bar	$n_{St}$ -	$n_{Feed}$ -	v -	u -
1. Rektifikation	75,3	0,107	24	23	1,44	0,50
2. Rektifikation	75,7	0,107	85	60	95,50	0,09



# Wahl der Prozessalternative

## Prozessflussbild: Pyrolyse, mechanische Aufbereitung, Trennung

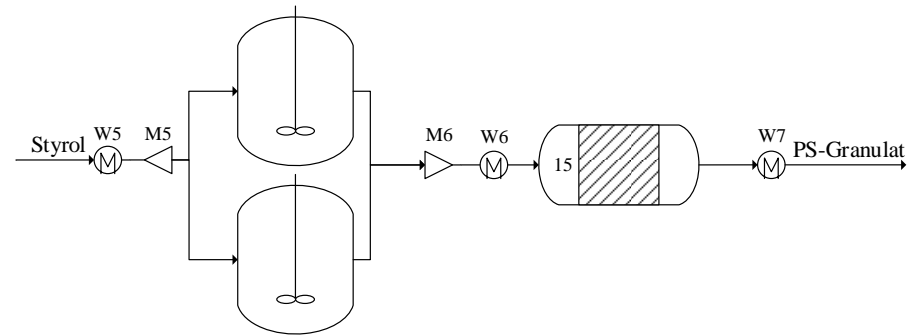
	T °C	p bar	$n_{St}$ –	$n_{Feed}$ –	v –	u –
1. Rektifikation	75,3	0,107	24	23	1,44	0,50
2. Rektifikation	75,7	0,107	85	60	95,50	0,09



# Polymerisation von Styrol

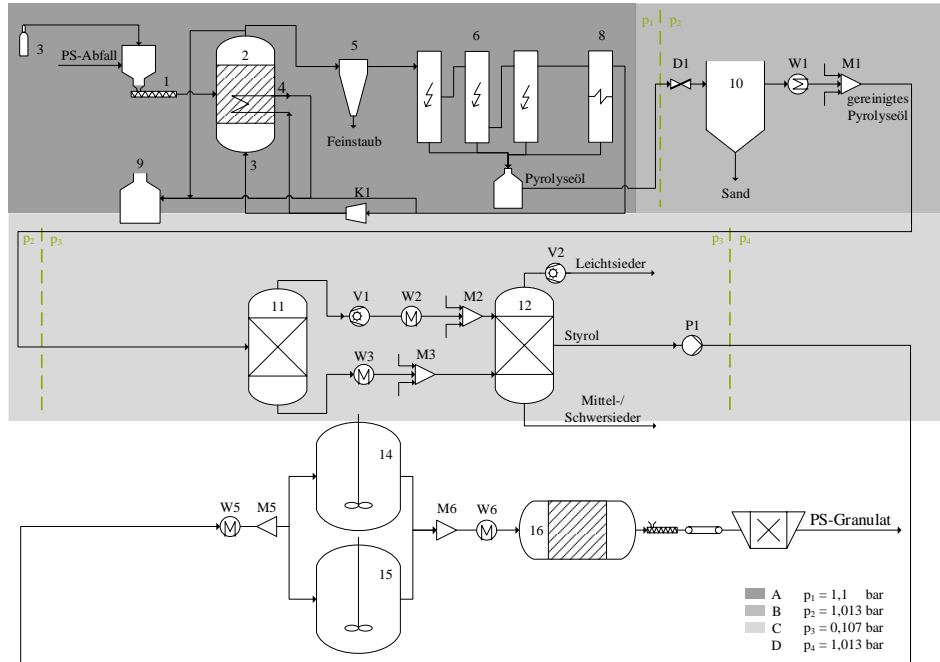
- Rein thermische Polymerisation
  - Ohne Lösungsmittel und Initiator
  - Nach dem Turmverfahren

	p bar	T °C	$\tau$ h	V m <sup>3</sup>	X %
CSTR1	1,013	90	55	100	32,31
CSTR2	1,013	90	55	100	32,31
RPlug	1,013	120-230	28	157	98,44

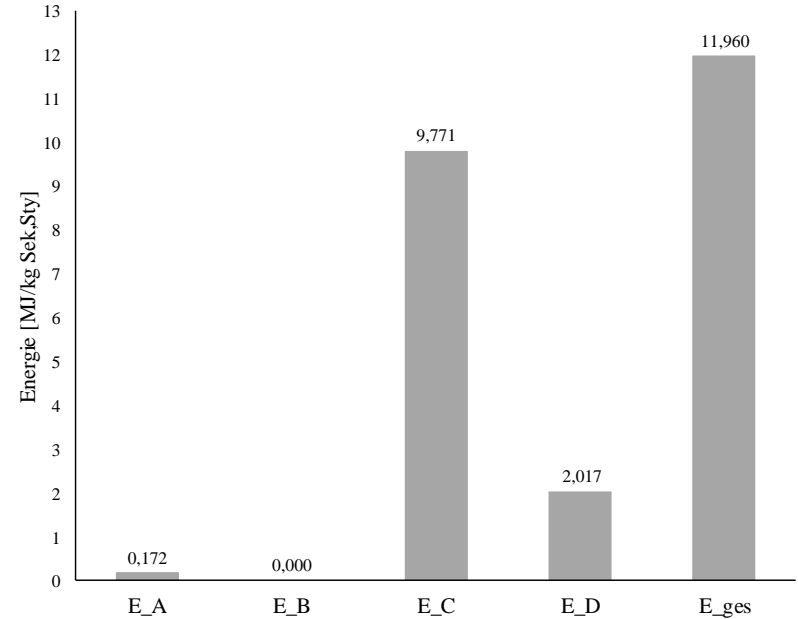


# Vollständiger Prozess

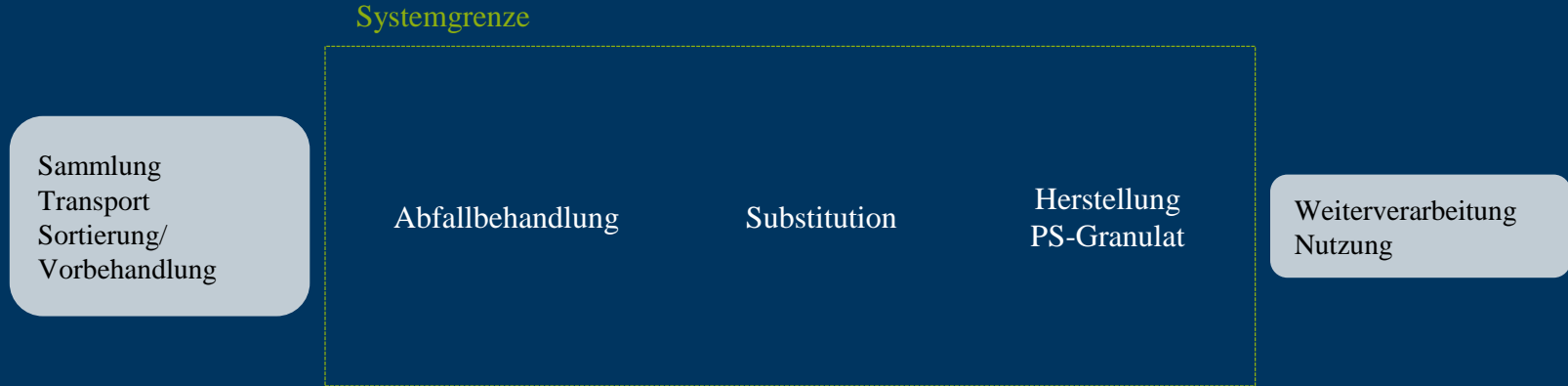
## Fließbild



## Energiebedarf

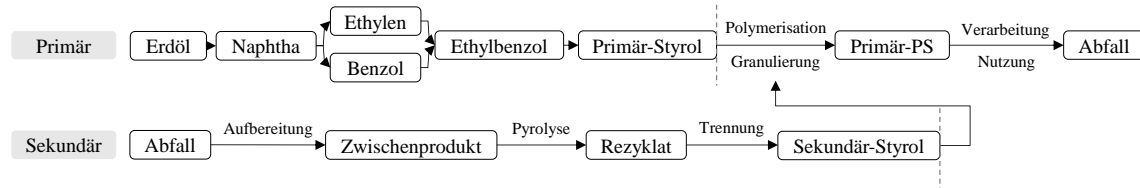


# Bewertungsmethode



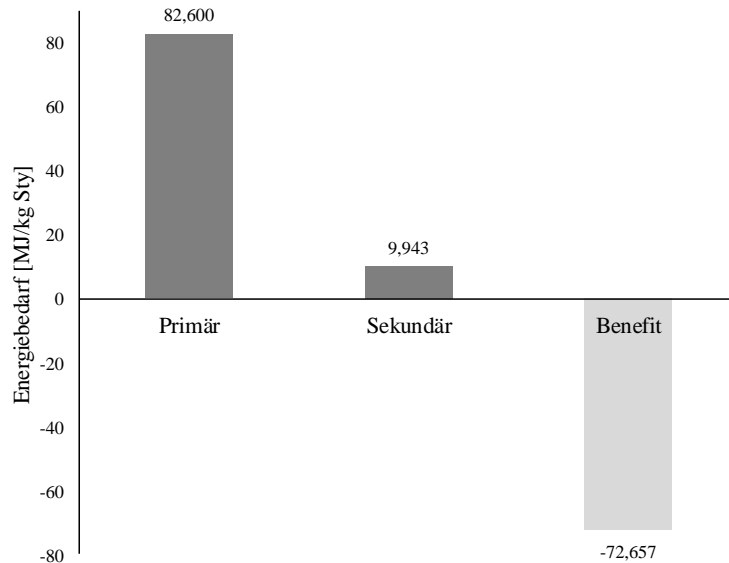
# Vergleich der Primär- und Sekundärroute

## Betrachtung bis zur Styrol-Herstellung



# Vergleich der Primär- und Sekundärroute

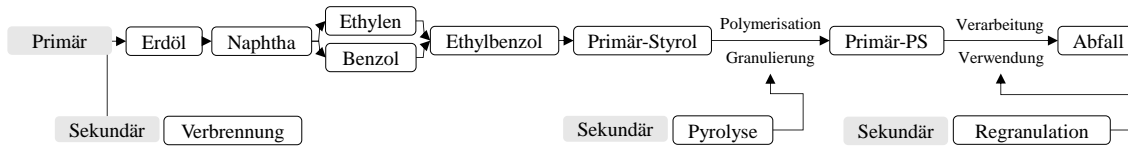
## Betrachtung bis zur Styrol-Herstellung



- Primär-Energiebedarf: Eco-Profile
- Sekundär-Energiebedarf: Simulation
- Durch Recycling Energieeinsparung von ca. 73 MJ/kg<sub>Sty</sub> möglich (*Vergleich PE, Quelle: Somoza-Tornos et al. 2020*)
- Verzicht auf energieintensive Herstellung von Primär-Styrol

# Vergleich verschiedener Verwertungsmethoden

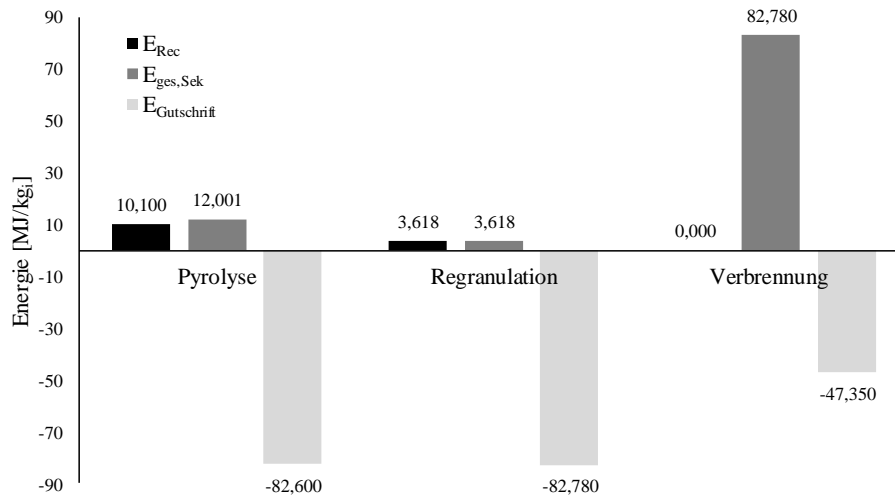
## Verwertungsmethoden: Pyrolyse, Regranulation, Verbrennung





# Vergleich verschiedener Verwertungsmethoden


## Verwertungsmethoden: Pyrolyse, Regranulation, Verbrennung

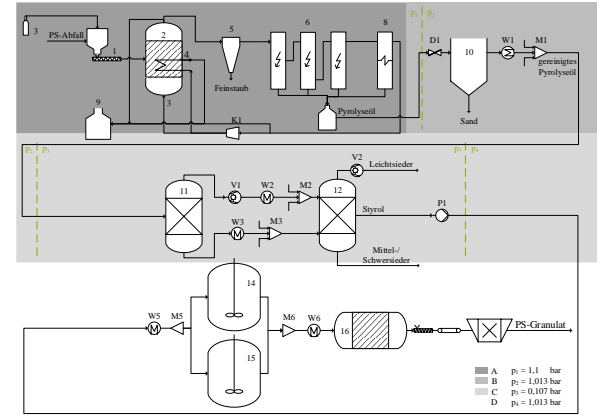


- Stoffliche  $\neq$  energetische Verwertung
- Stoffliche Verwertungen ähnlich
  - $E_{Rec}$  Pyrolyse  $>$   $E_{Rec}$  Regranulation
  - $E_{ges,Sek}$  Pyrolyse  $>$   $E_{ges,Sek}$  Regranulation
  - Gutschriften gleich hoch
- Vereinfachungen: Bilanzraum, Gutschriften, Qualitätsabschlag

# Fazit

# Fazit der Arbeit

- Vollständiger Sekundärweg von Polystyrol besteht aus
  - a. Pyrolyse 
  - b. Aufbereitung
  - c. Trennung: zwei Vakuumrektifikationskolonnen (Vorfraktionierungs-Verschaltung)
  - d. Polymerisation
- Energetische Bewertung des Sekundärwegs
  - Energieeinsparung von ca. 73 MJ/kg<sub>Sty</sub> bei der Herstellung von Styrol
  - Vergleichbarer Energieverbrauch (werkstoffliche Verwertung)
  - Schließt den Lebenszyklus durch Gewinnung von qualitativ hochwertigen Sekundärrohstoffe



# Kontakt Daten

Amelie Merkel

merkel@fluidvt.rub.de | 0234 32 26344

Philip Biessey

biessey@fluidvt.rub.de | 0234 32 26193