

## Durchbruch der breiten Anwendung von Vakuumverfahren beim Einsatzhärten - DAVE

Ergebnisse des Teilprojekts 1:

### Ingenieurtechnisches Modell für den Kohlenstoffübergang

T. Waldenmaier<sup>1</sup>, C. Sauerborn<sup>2</sup>

# DAVE

Durchbruch der breiten Anwendung von  
Vakuumverfahren beim Einsatzhärten

<sup>1</sup> Robert Bosch GmbH, CR/APM4

<sup>2</sup> Universität Karlsruhe, EBI



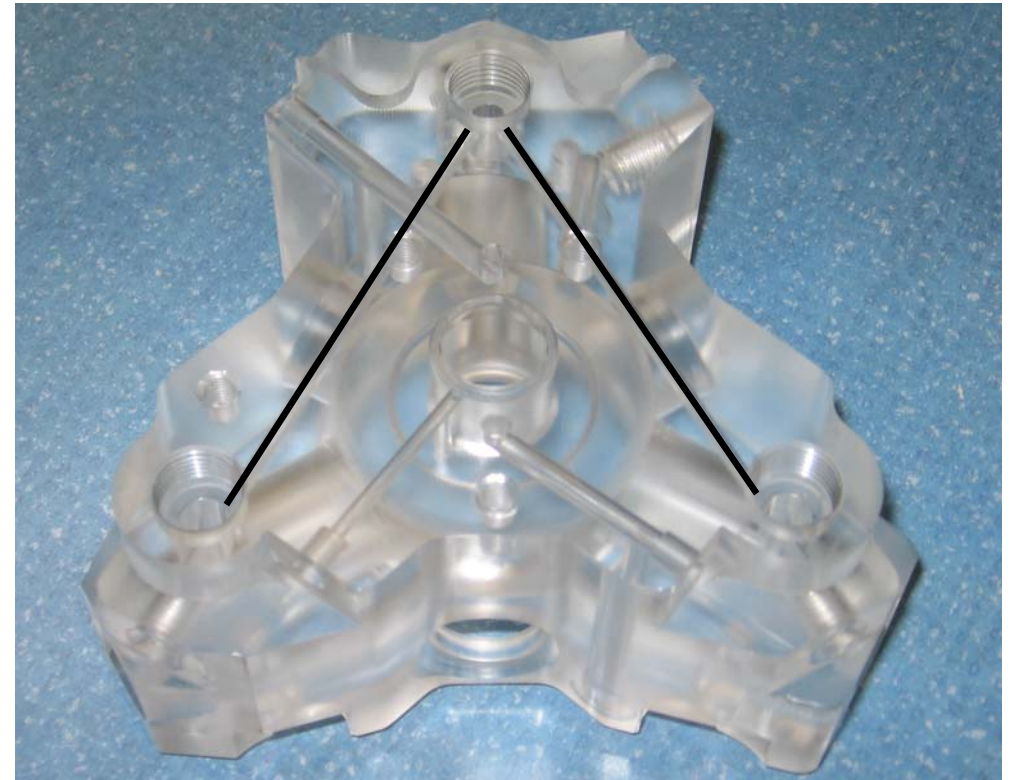
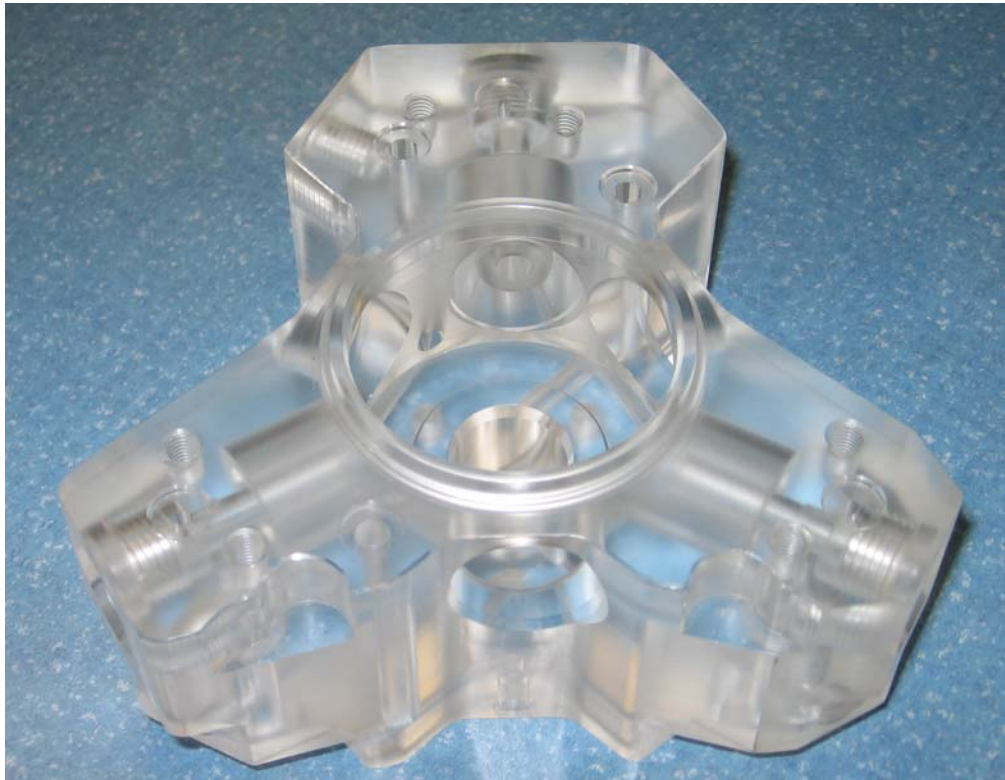
## Gliederung

- Motivation und Zielsetzung
- Modellierung
- Versuchsprogramm
- Parametrisierung
- Validierung
- Verwertung
- Zusammenfassung



## Motivation

- Empirische Simulationswerkzeuge zur Vorhersage der Aufkohlung bei einfachen Geometrien sind vorhanden
- Typische einsatzgehärtete Bosch-Bauteile besitzen komplexe Geometrien, z.B. Hochdruckbohrungen von Dieseleinspritzsystemen

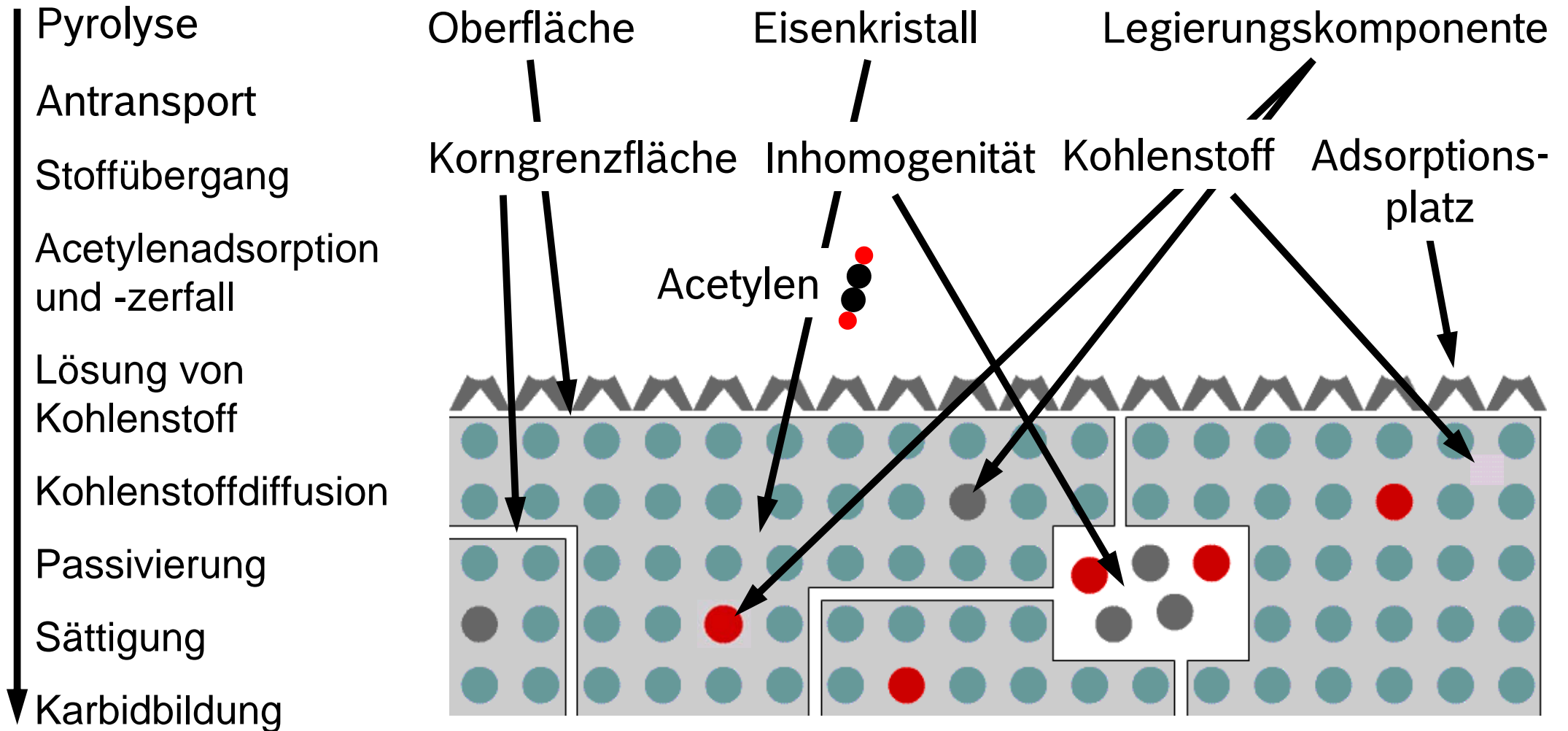


## Zielsetzung

- Ingenieurtechnisches Modell zur ganzheitlichen Abbildung des Stofftransports an komplexen Bauteilen
- Einsatz des Modells zur Auslegung neuer Bauteile und Prozesse



## Modellierung



## Modellierung

### Pyrolyse

Antransport

Stoffübergang

Acetylenadsorption  
und -zerfall

Lösung von  
Kohlenstoff

Kohlenstoffdiffusion

Passivierung

Sättigung

↓  
Karbidbildung

- Detaillierte Betrachtung der Gasreaktionen in Teilprojekt 3
- Acetylenkonzentration ist für die Aufkohlung entscheidend
- ➔ Reduzierte Acetylenkonzentration an Probe durch Pyrolyse wird für Aufkohlungsberechnung als Eintrittsbedingung verwendet

## Modellierung

Pyrolyse

**Antransport**

Stoffübergang

Acetylenadsorption  
und -zerfall

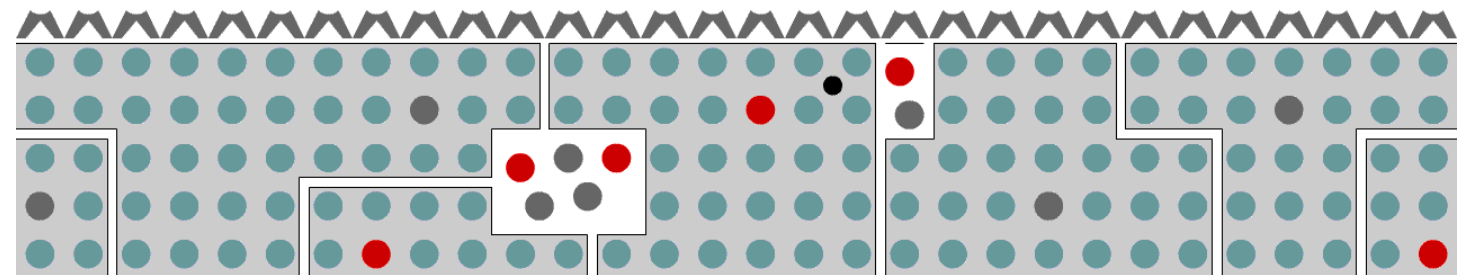
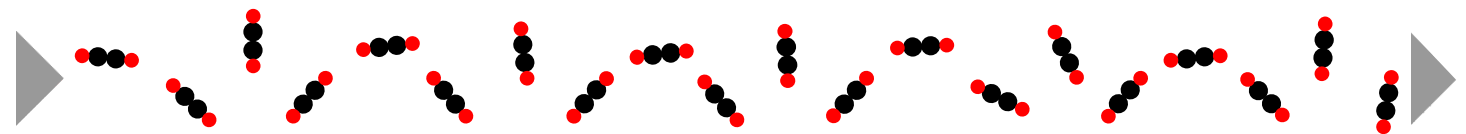
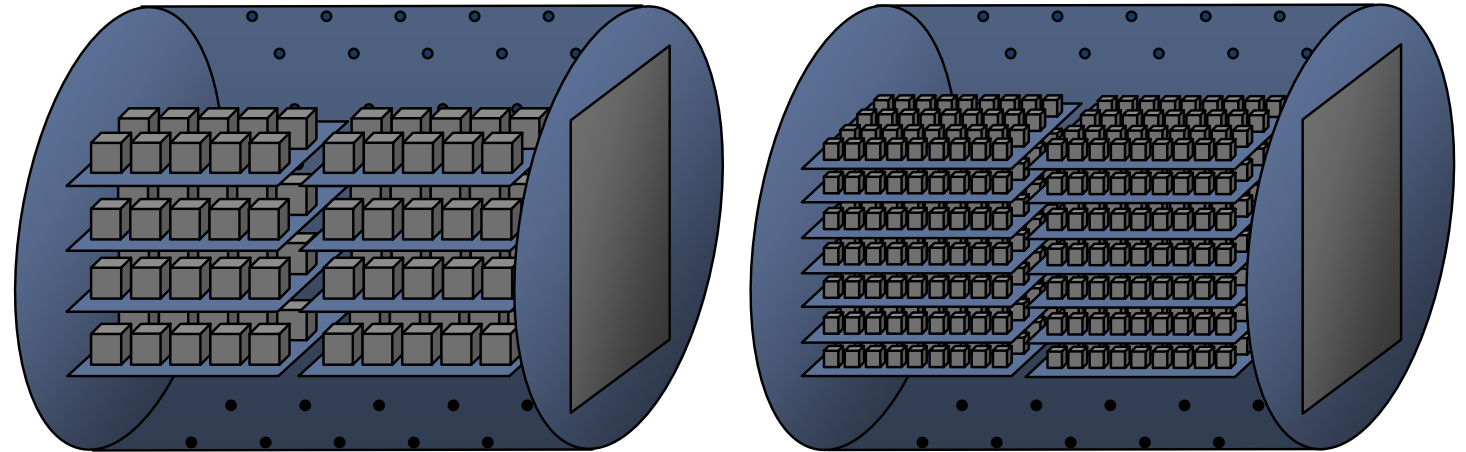
Lösung von  
Kohlenstoff

Kohlenstoffdiffusion

Passivierung

Sättigung

↓  
Karbidbildung



## Modellierung

Pyrolyse

Antransport

**Stoffübergang**

Acetylenadsorption  
und -zerfall

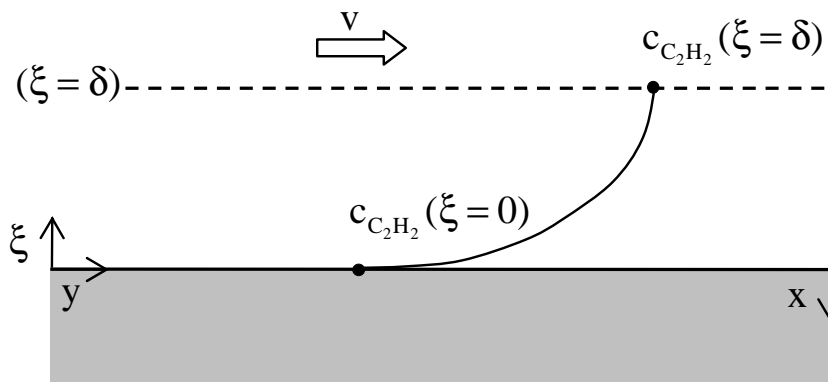
Lösung von  
Kohlenstoff

Kohlenstoffdiffusion

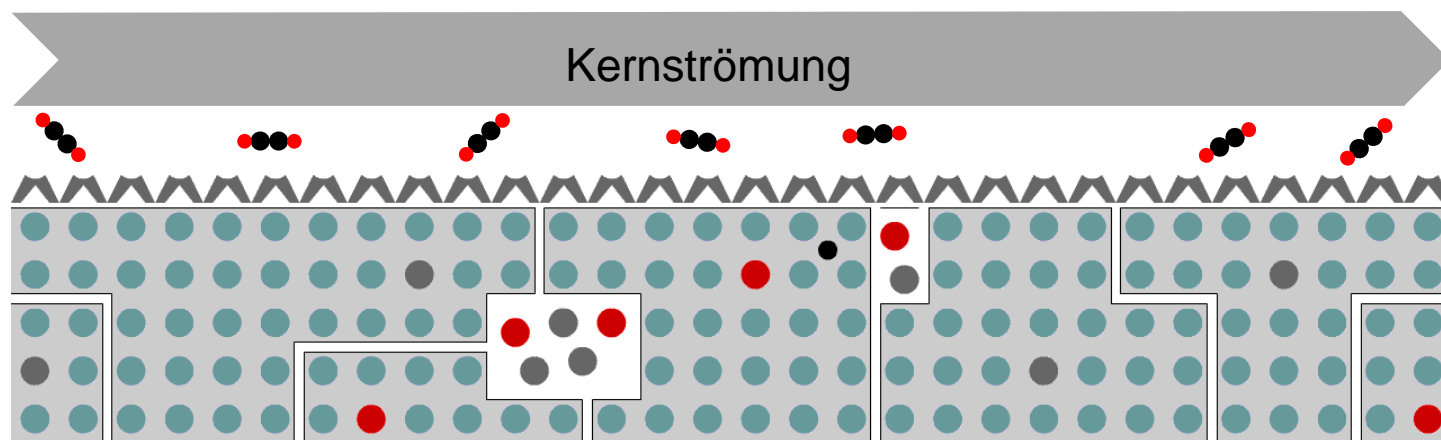
Passivierung

Sättigung

Karbidbildung

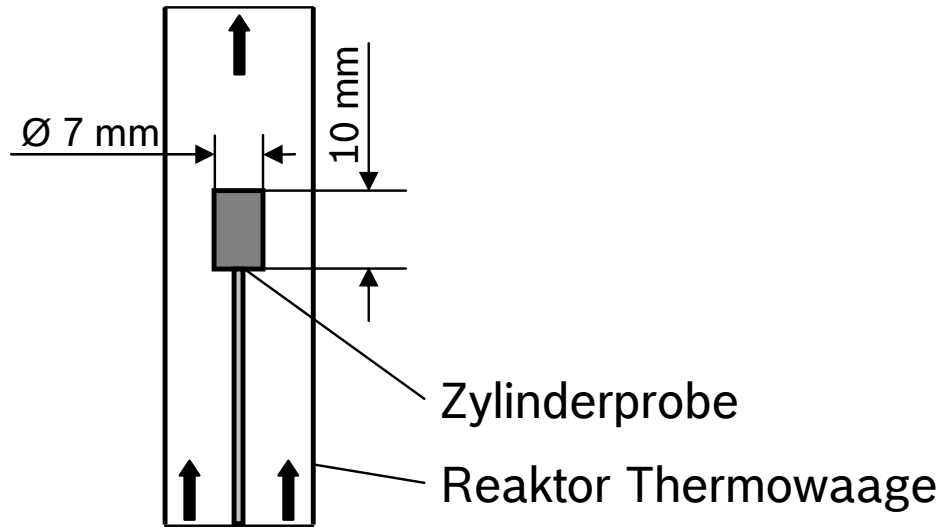


Stoffmengenstrom: 
$$j_{C_2H_2} = A \cdot \beta \cdot (c_{C_2H_2}(\xi = \delta) - c_{C_2H_2}(\xi = 0))$$

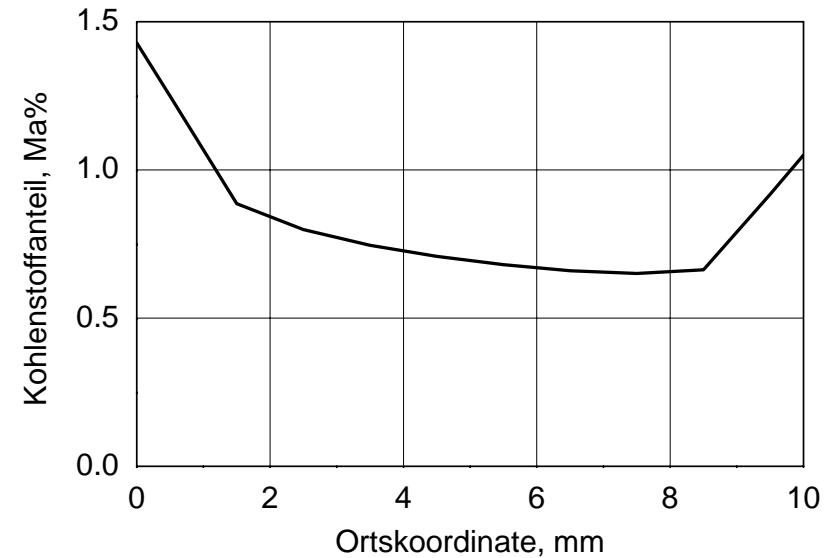
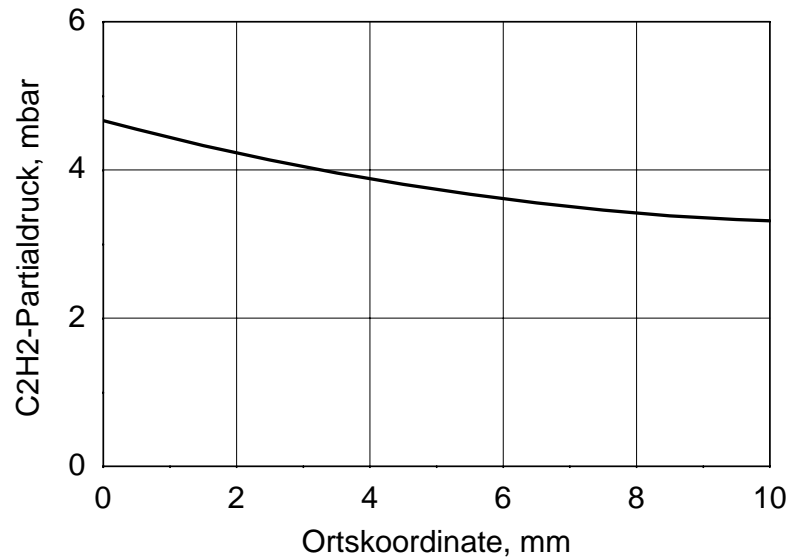
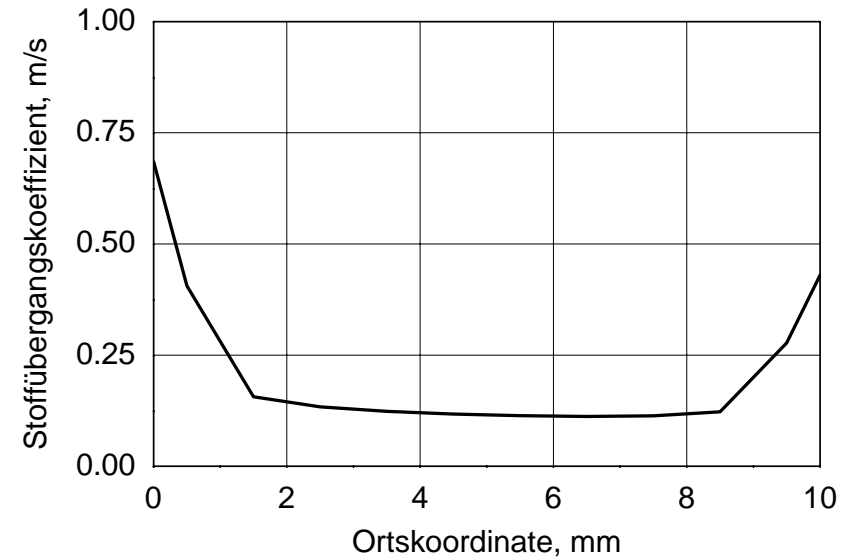




## Stoffübergang



Kommentar: die Kurven sind beispielhafte Simulationsrechnungen



## Modellierung

Pyrolyse

Antransport

Stoffübergang

**Acetylenadsorption  
und -zerfall**

Lösung von  
Kohlenstoff

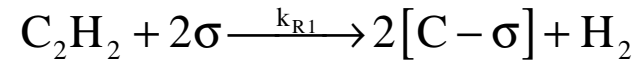
Kohlenstoffdiffusion

Passivierung

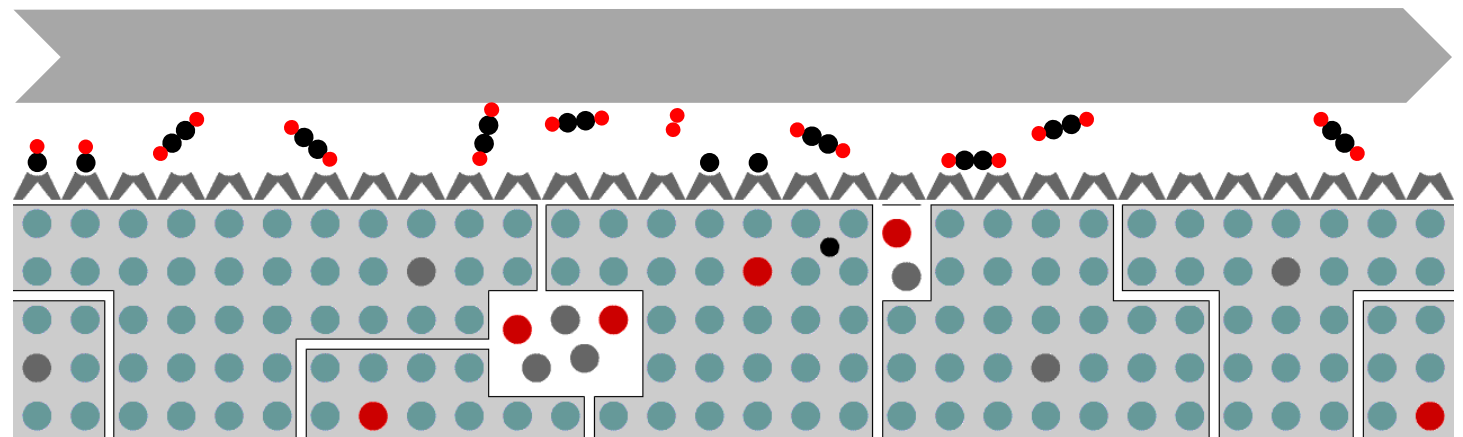
Sättigung

↓  
Karbidbildung

Vorgang kann mit einem formalkinetischen  
chemischer Reaktionsansatz beschrieben werden:



$\sigma$  Adsorptionsplatz



## Modellierung

Pyrolyse

Antransport

Stoffübergang

Acetylenadsorption  
und -zerfall

**Lösung von  
Kohlenstoff**

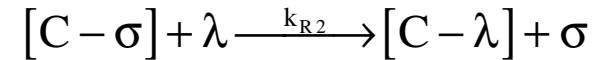
Kohlenstoffdiffusion

Passivierung

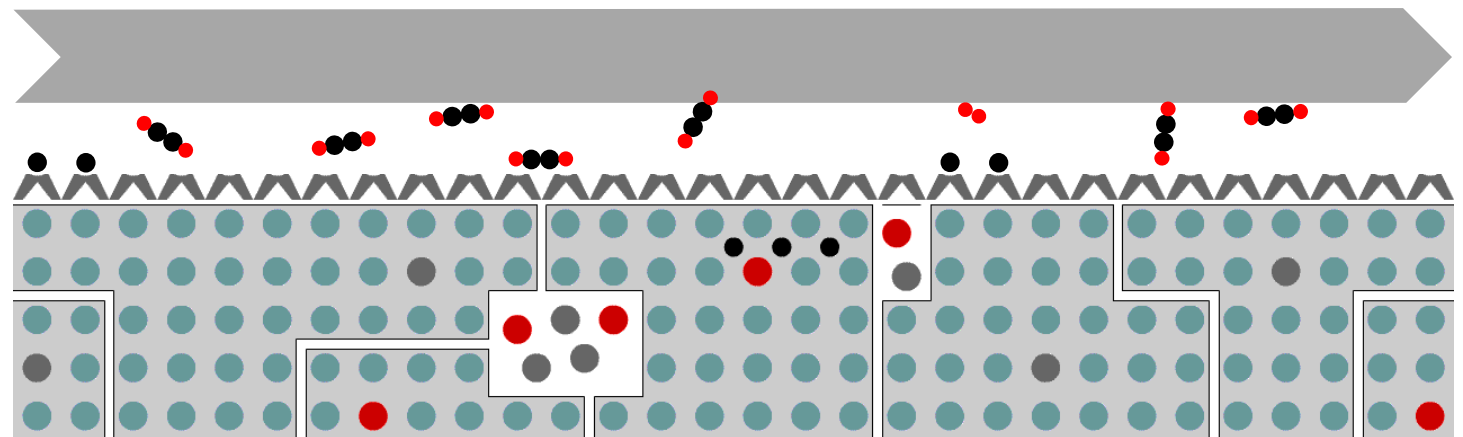
Sättigung

Karbidbildung

Vorgang kann mit einem formalkinetischen  
chemischer Reaktionsansatz beschrieben werden:



$\lambda$  Lösungsplatz



## Modellierung

Pyrolyse

Antransport

Stoffübergang

Acetylenadsorption  
und -zerfall

Lösung von  
Kohlenstoff

**Kohlenstoffdiffusion**

Passivierung

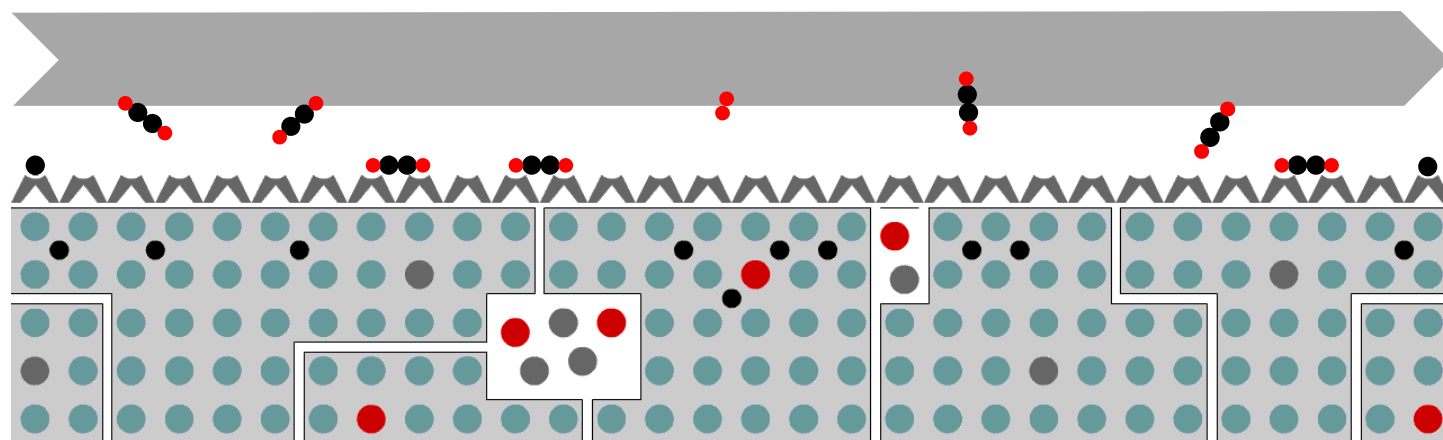
Sättigung

Karbidbildung

Diffusionskoeffizient nach Collin:

$$D_C = 1,43 \cdot \exp\left[\frac{-19900}{T}\right] \cdot \exp\left[2,42 \cdot 10^{-3} \cdot \tilde{x}_C \cdot \exp\left(\frac{6790}{T}\right)\right] \cdot (1 - 23,2 \cdot \tilde{x}_C)$$

$x_C$  Kohlenstoffanteil



## Modellierung

Pyrolyse

Antransport

Stoffübergang

Acetylenadsorption  
und -zerfall

Lösung von  
Kohlenstoff

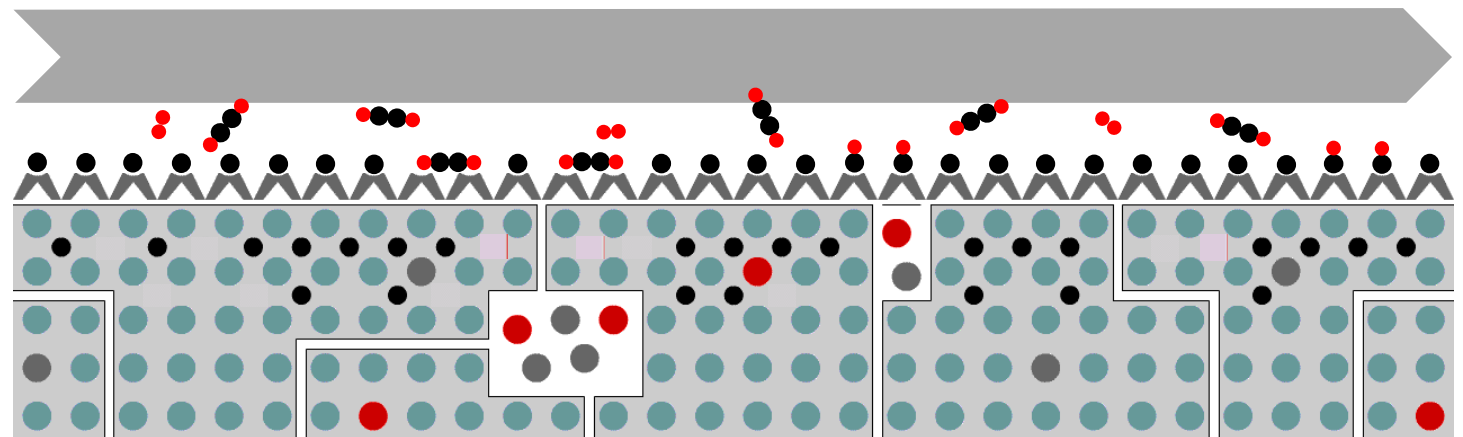
Kohlenstoffdiffusion

**Passivierung**

Sättigung

Karbidbildung

- Detaillierte Betrachtung des Adsorptionsverhalten von Acetylen in Teilprojekt 2
- Oberflächenbelegung wird durch Kopplung zwischen Gas- und Feststoffkonzentrationen berücksichtigt



## Modellierung

Pyrolyse

Antransport

Stoffübergang

Acetylenadsorption  
und -zerfall

Lösung von  
Kohlenstoff

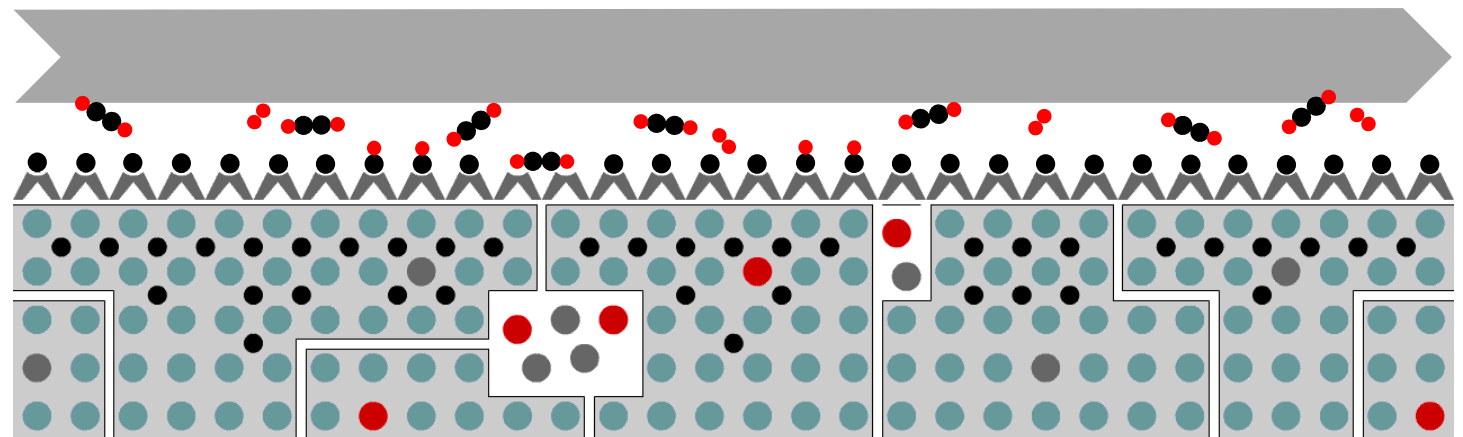
Kohlenstoffdiffusion

Passivierung

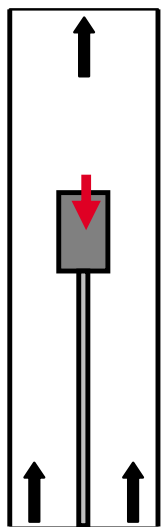
**Sättigung**

Karbidbildung

- Stofftransport ist bei weiterhin ausreichendem Acetylenangebot nur durch die Kohlenstoffdiffusion im Stahl limitiert



## Sättigung



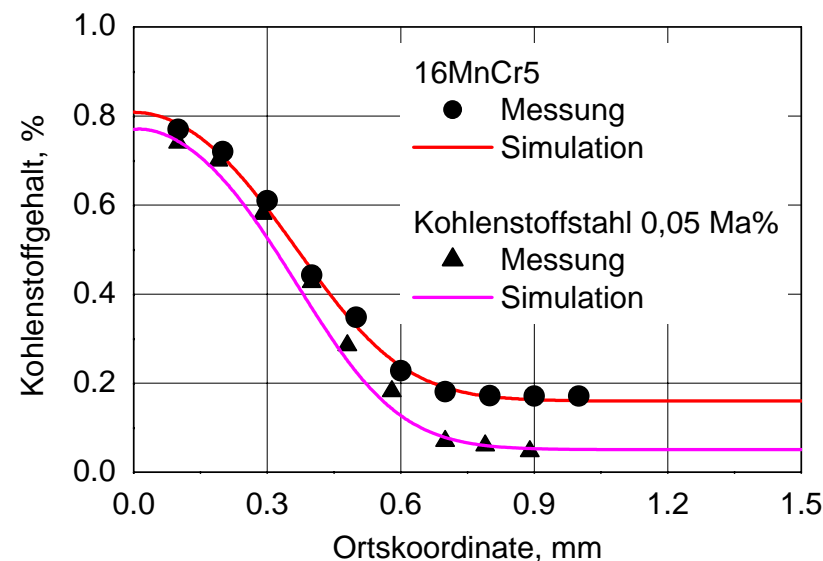
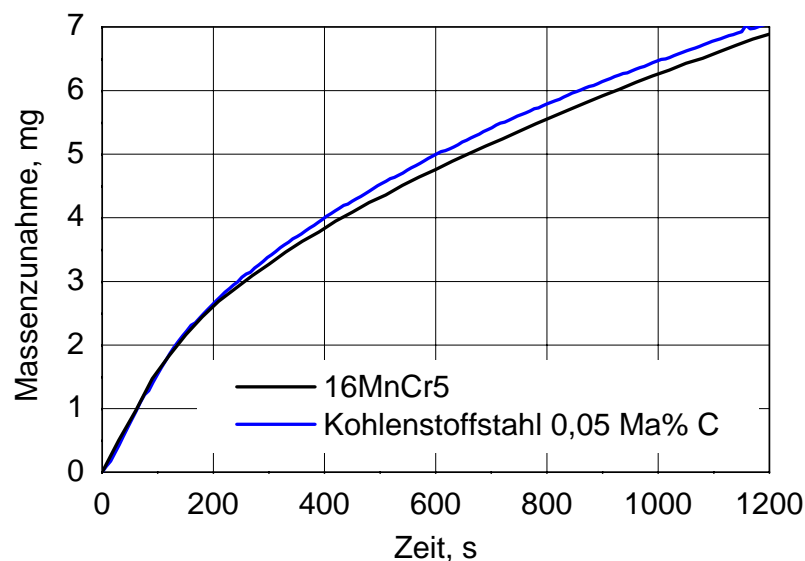
**Vergleich mit Kohlenstoffstahl (0,05 Ma%):**

Temperatur: 960 °C

Volumenstrom: 9 nl/h

Acetylenpartialdruck: 10 mbar

→ Einfluss Legierungskomponenten auf Sättigung bei 16MnCr5 vernachlässigbar



## Modellierung

Pyrolyse

Antransport

Stoffübergang

Acetylenadsorption  
und -zerfall

Lösung von  
Kohlenstoff

Kohlenstoffdiffusion

Passivierung

Sättigung

▼ **Karbidbildung**

### Versuchsparameter:

Temperatur: 960 °C

Aufkohlungsdauer: 600s

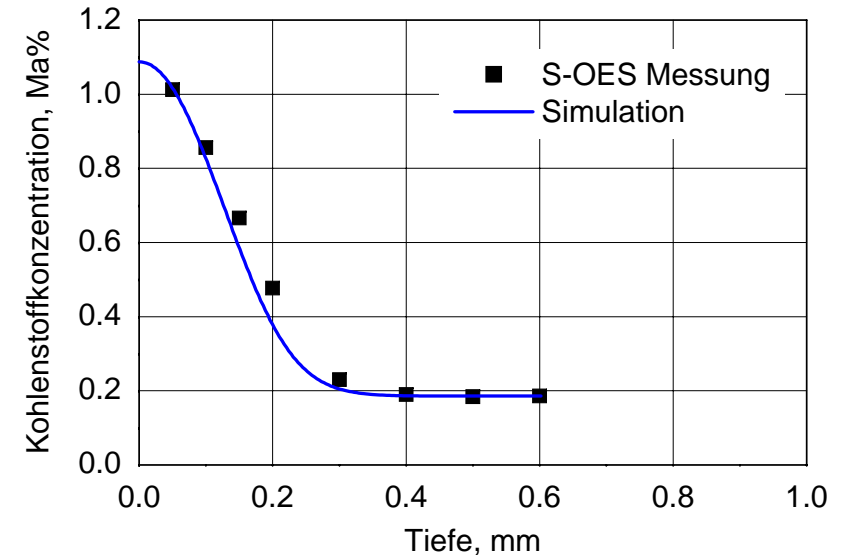
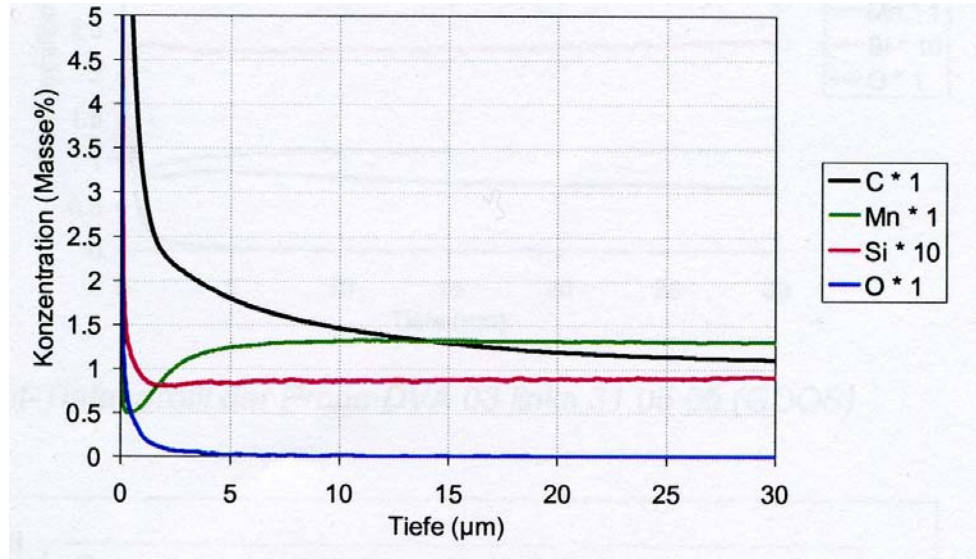
Diffusion: ca. 60 s

20MnCr5





## Karbidbildung



→ Karbidbildung ist für die Berechnung des resultierenden Kohlenstoffprofils beim 16MnCr5 vernachlässigbar

## Versuchsprogramm

### **Thermowaage** (Gesamtdruck 1000 mbar)

- Acetylen-Partialdruck 1,38; 1,84; 3; 5,36; 10 mbar
- Durchsatz 6; 9; 12 nl/h
- Temperatur 850; 900; 930; 960; 1000; 1050 °C
- Aufkohlungsdauer 600; 1200; 1800; 2400 s

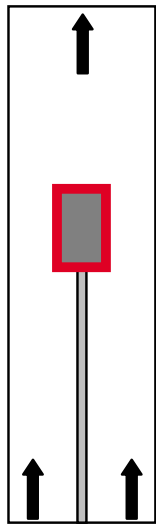
### **Vakuumanlage** (Acetylen-Partialdruck 3,2 mbar)

- Gesamtdruck 3,2; 6,4; 20; 200 mbar
- Durchsatz 3 nl/h
- Temperatur 850; 900; 930; 960; 1000; 1050 °C
- Aufkohlungsdauer 30; 60; 180; 300; 600 s

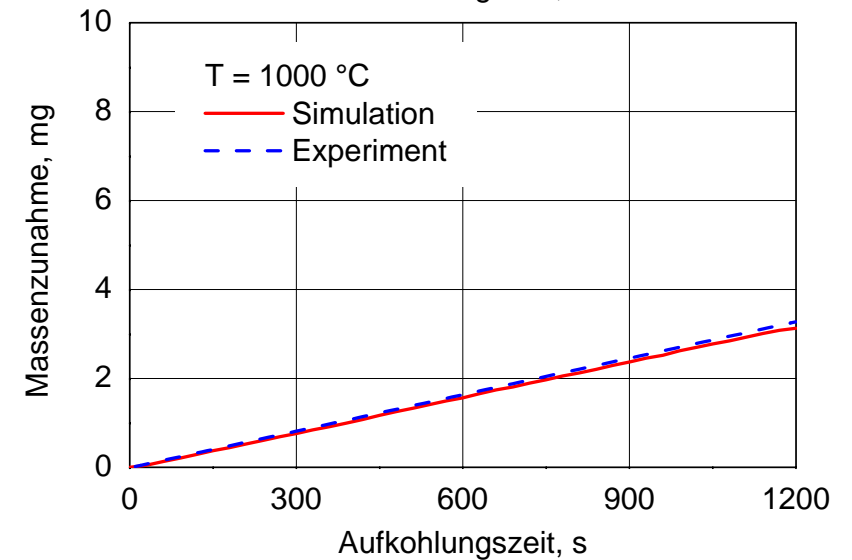
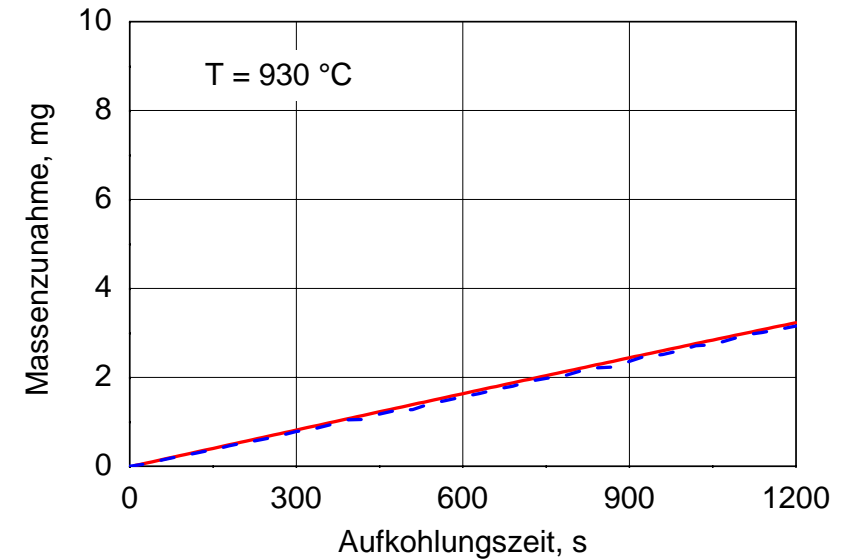
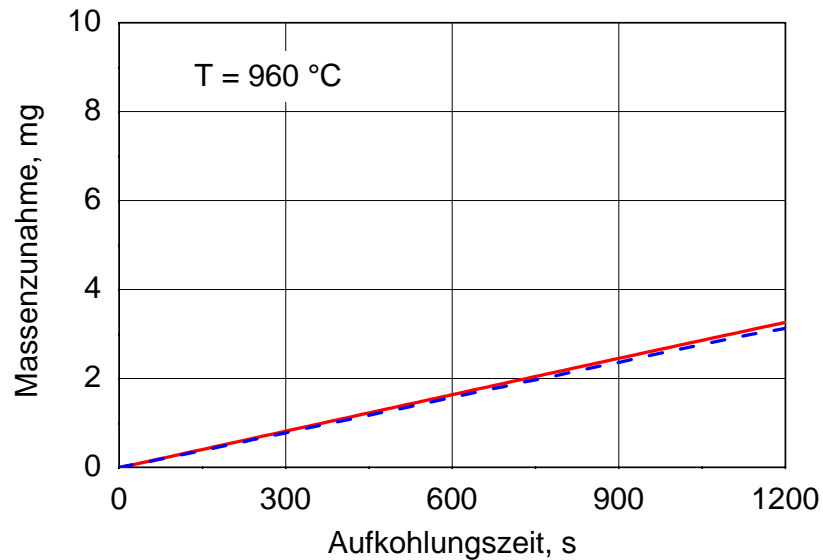
## Parametrisierung

- Vollständige Modellierung des Aufkohlungsprozesses
- Parameterstudie über gesamten Partialdruck- und Temperaturbereich  
1,38 – 10 mbar und 850 – 1050 °C
- Diskussion der Messungenauigkeiten
- ➔ Festlegung von temperaturunabhängigen Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten

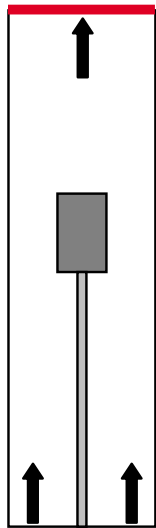
## Validierung



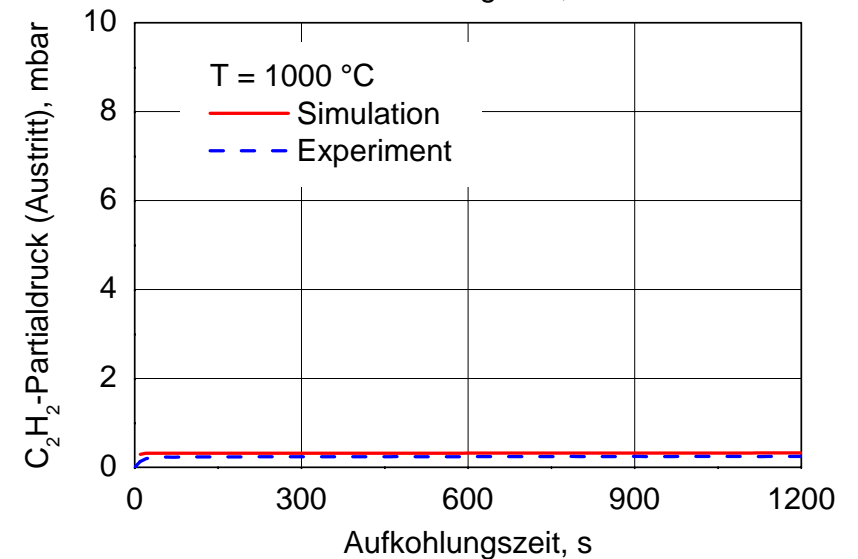
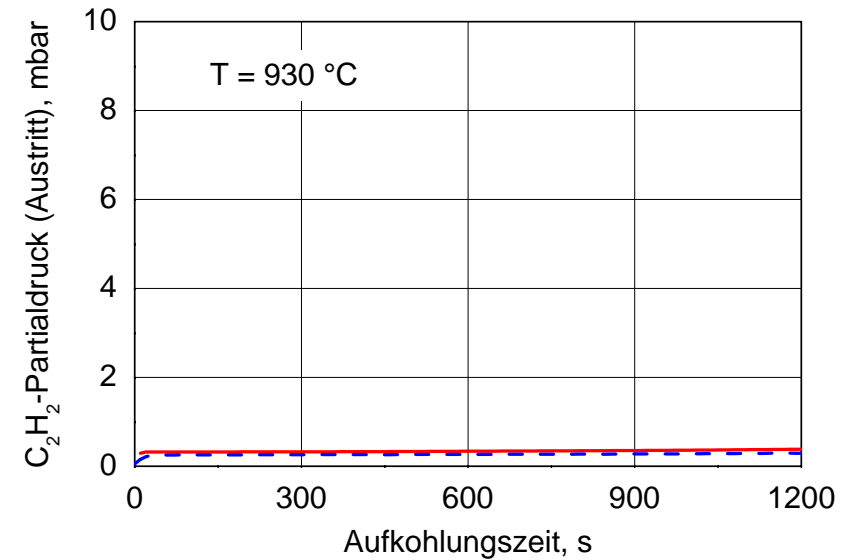
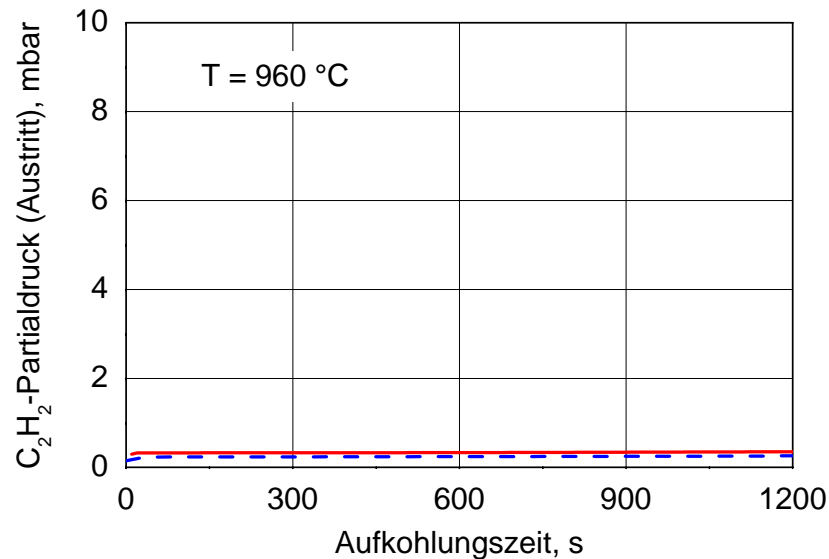
**Parameter:**  
Acetylenpartialdruck: 1,38 mbar  
Durchsatz: 9 nl/h



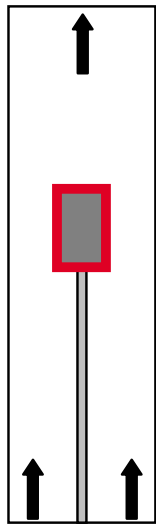
## Validierung



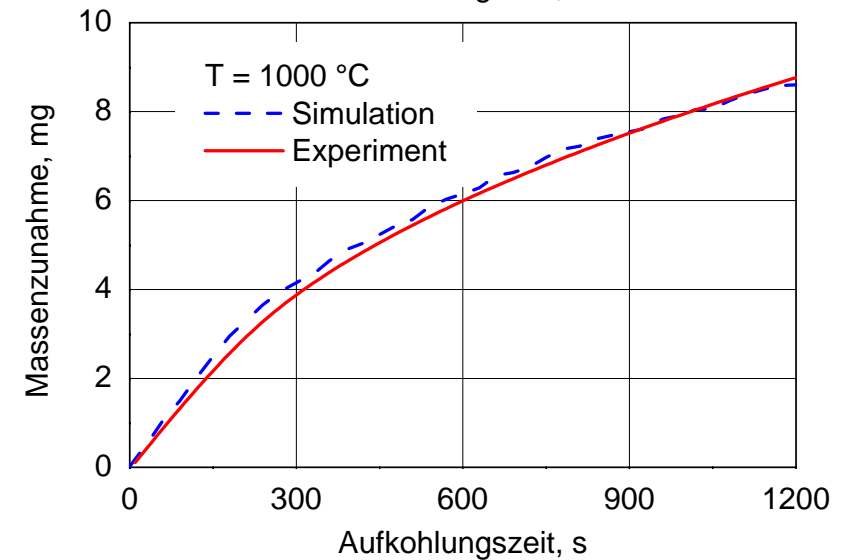
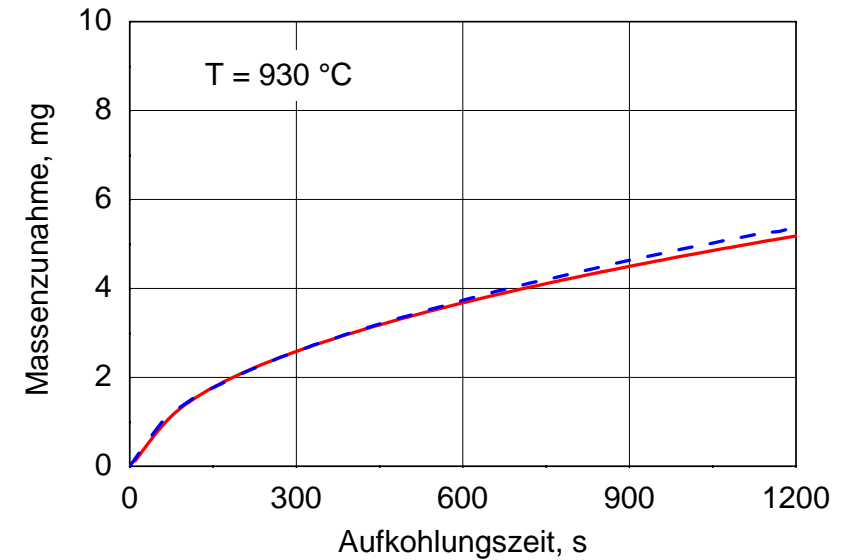
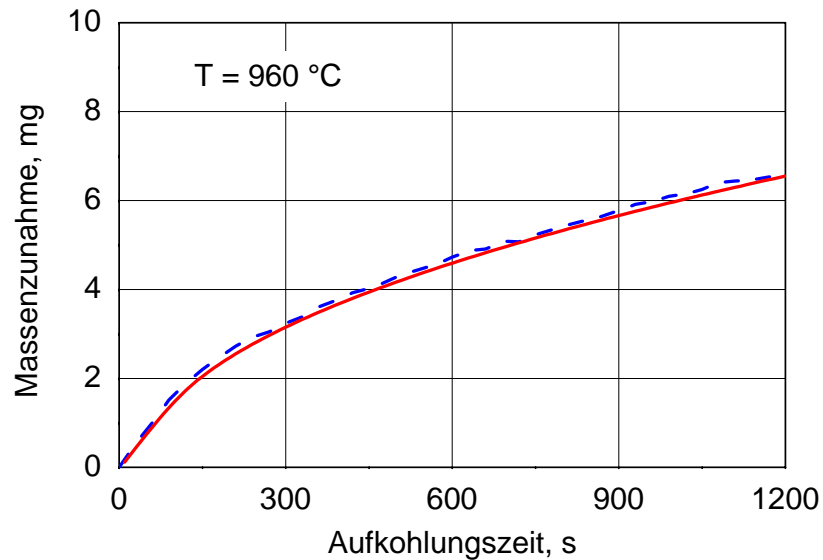
**Parameter:**  
Acetylenpartialdruck: 1,38 mbar  
Durchsatz: 9 nl/h



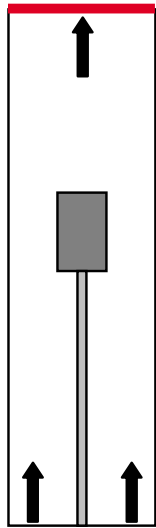
## Validierung



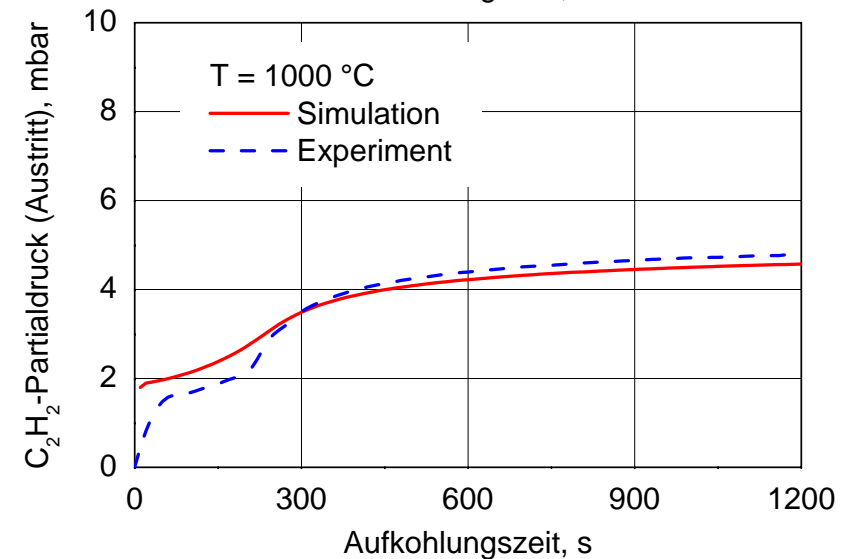
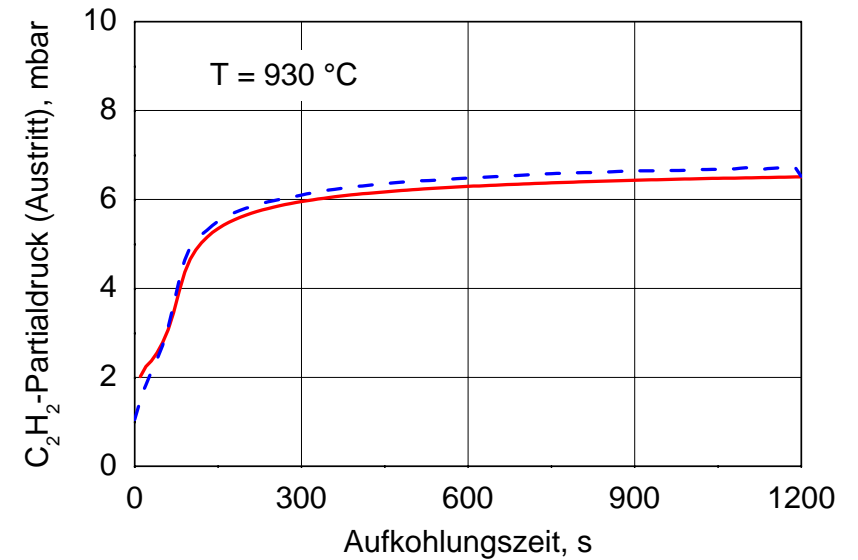
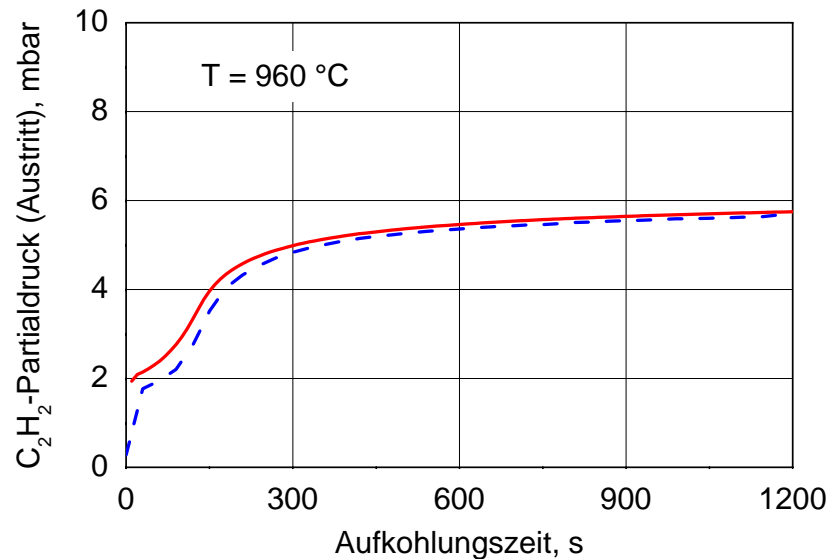
**Parameter:**  
Acetylenpartialdruck: 10 mbar  
Durchsatz: 9 nl/h



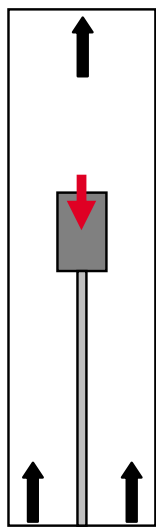
## Validierung



**Parameter:**  
Acetylenpartialdruck: 10 mbar  
Durchsatz: 9 nl/h



## Validierung

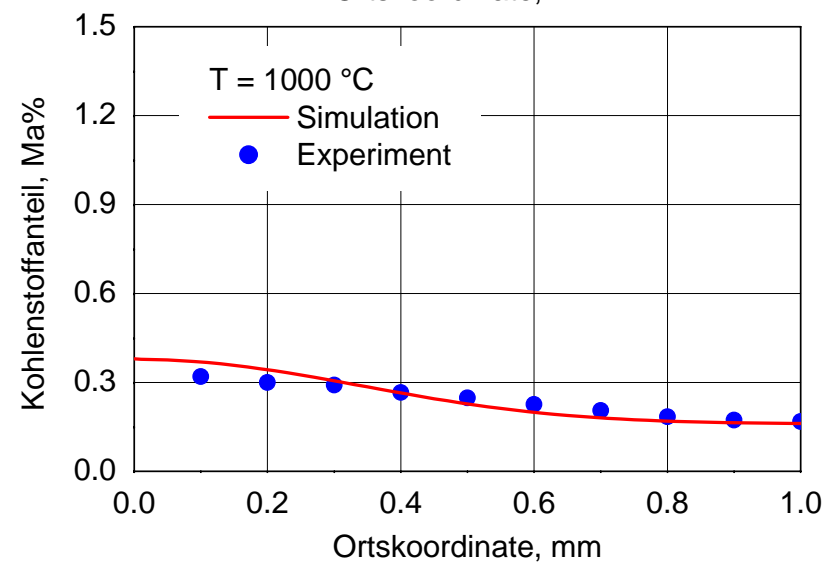
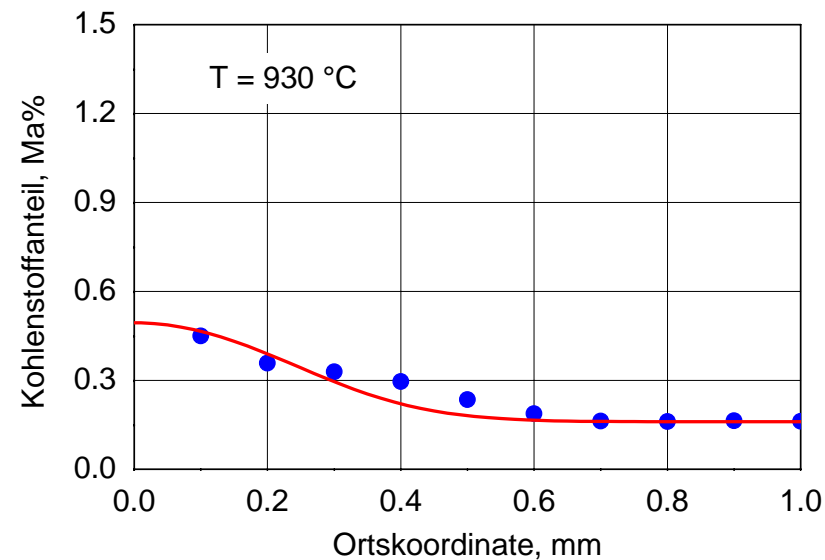
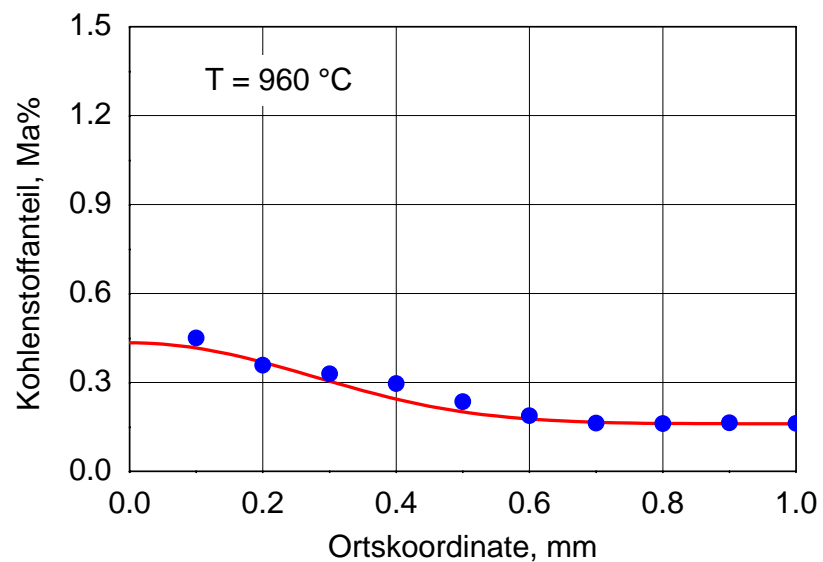


### Parameter:

Aufkohlungsdauer: 600 s

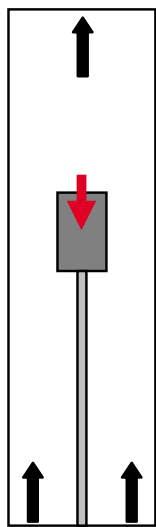
Acetylenpartialdruck: 1,38 mbar

Durchsatz: 9 nl/h





## Validierung

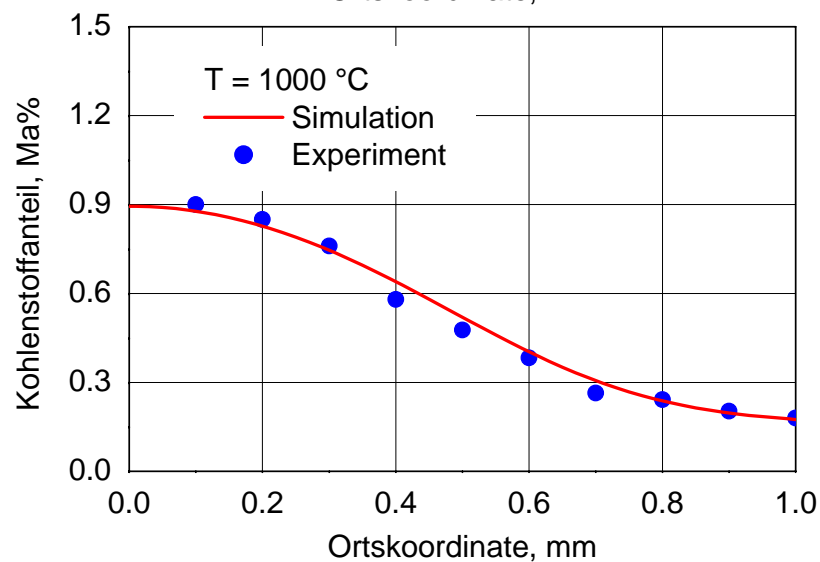
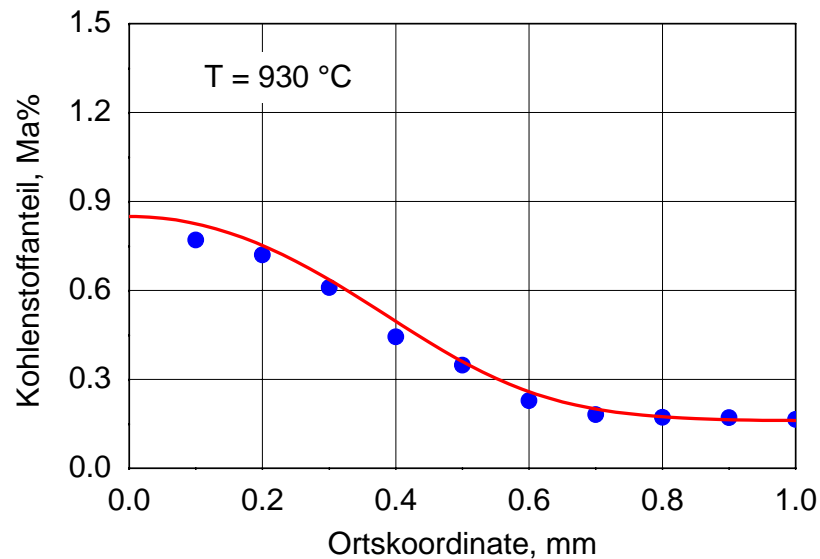
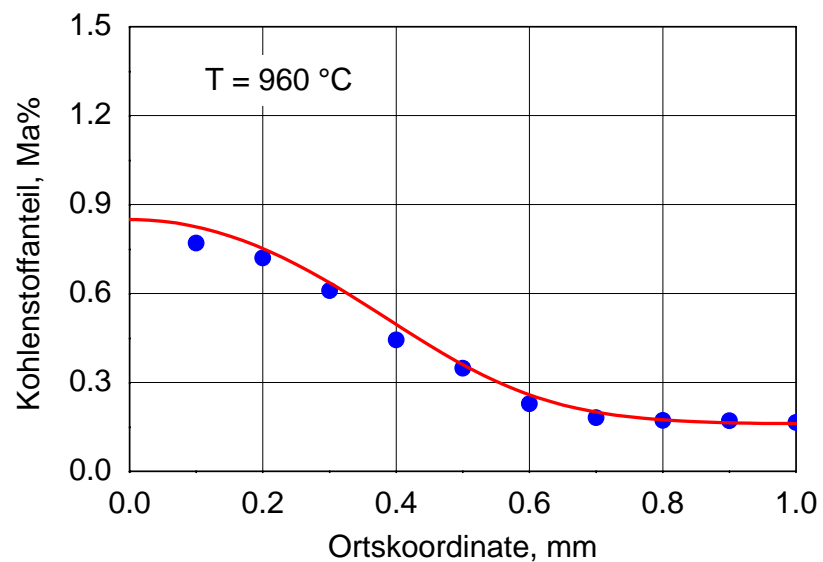


### Parameter:

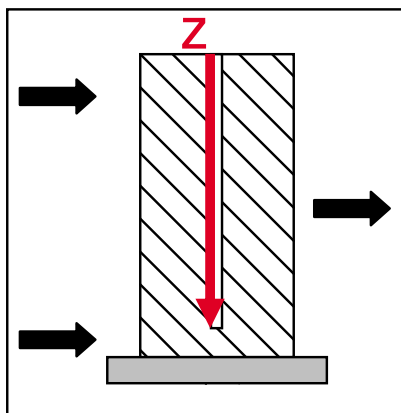
Aufkohlungsdauer: 600 s

Acetylenpartialdruck: 10 mbar

Durchsatz: 9 nl/h



## Validierung



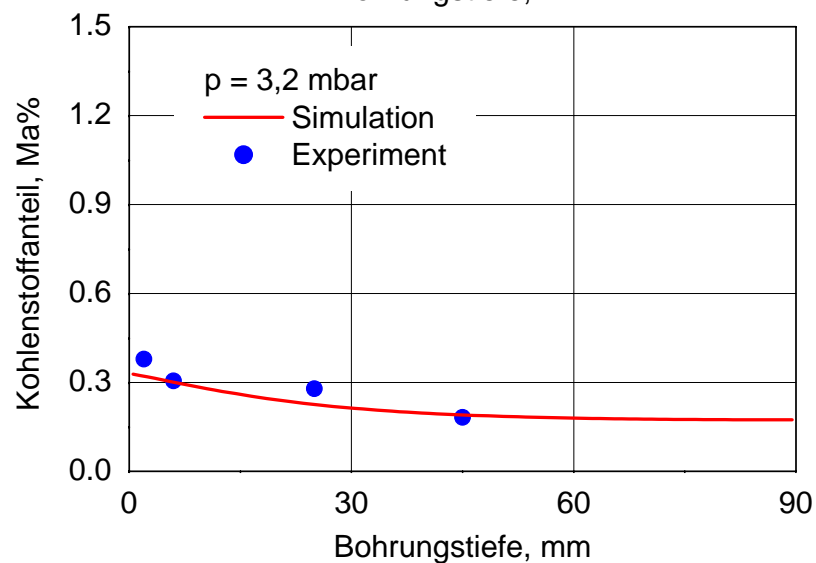
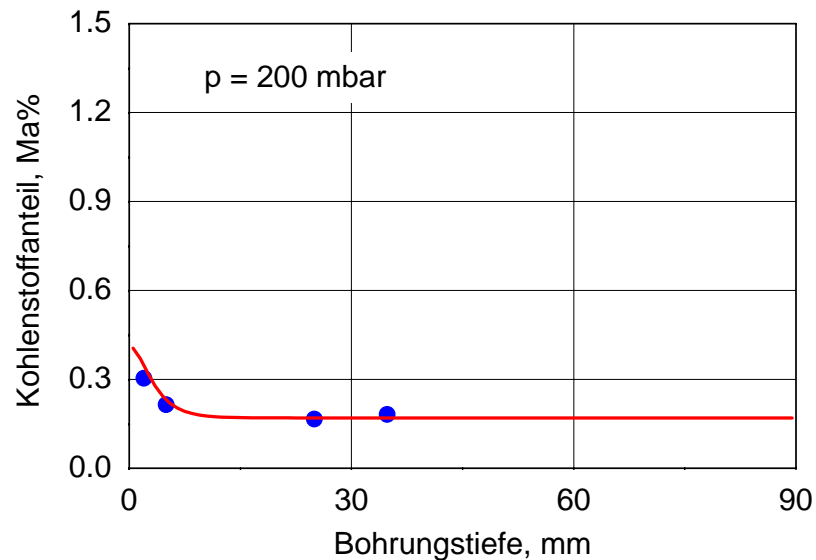
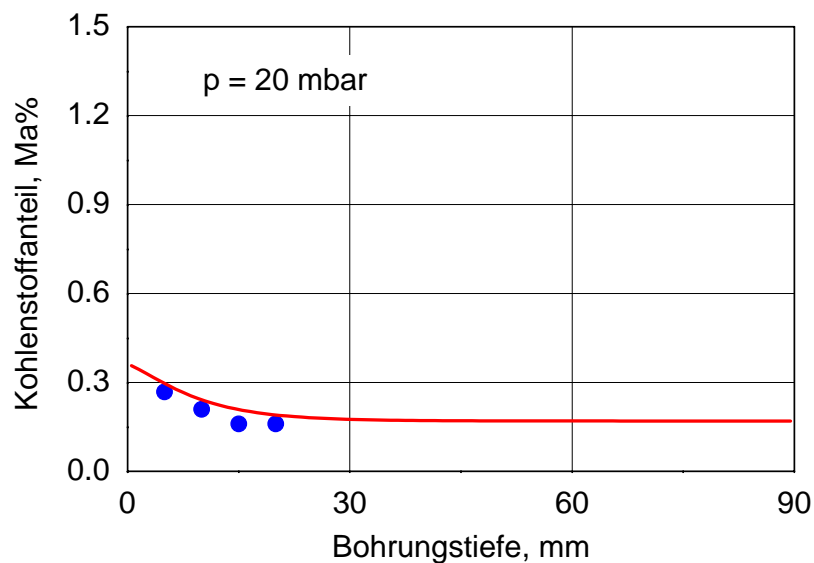
### Parameter:

Temperatur: 960 °C

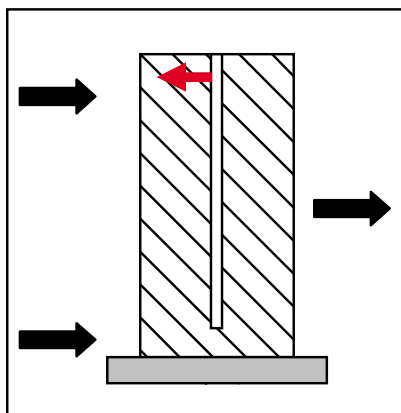
Aufkohlungsdauer: 300 s

Acetylenpartialdruck: 3,2 mbar

Durchsatz: 3 nl/h



## Validierung



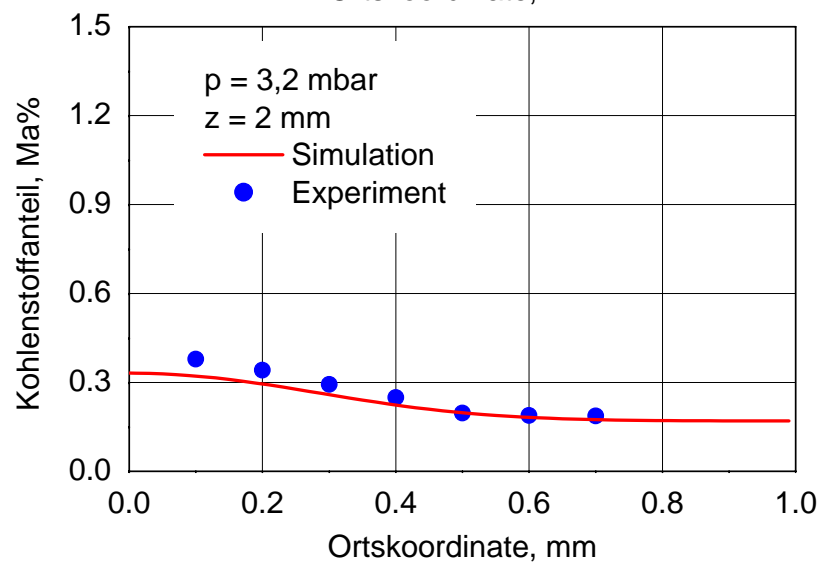
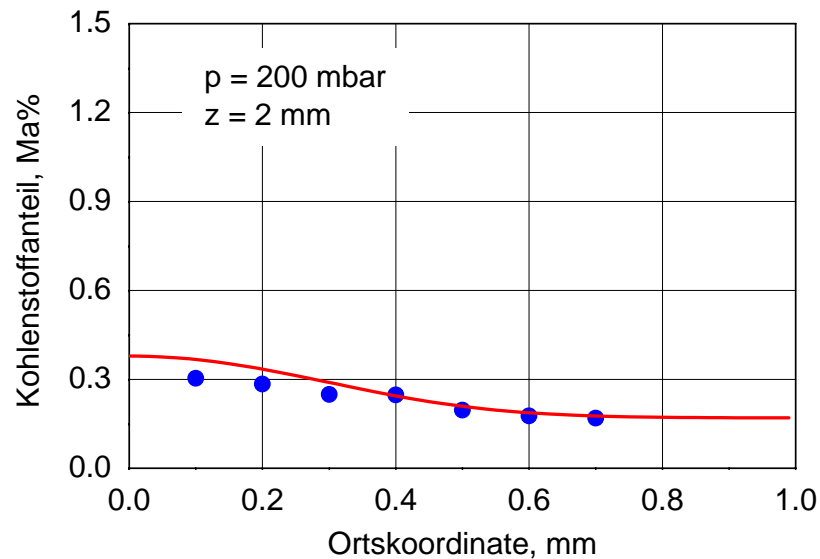
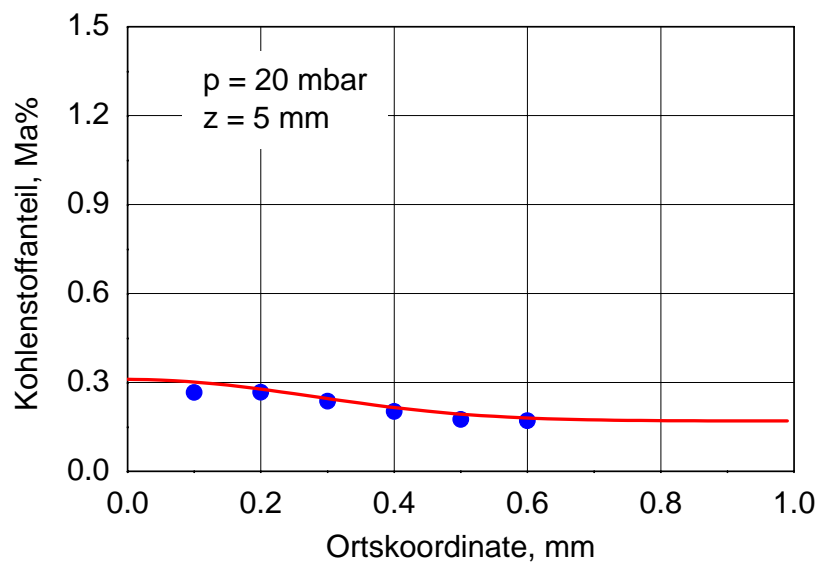
### Parameter:

Temperatur: 960 °C

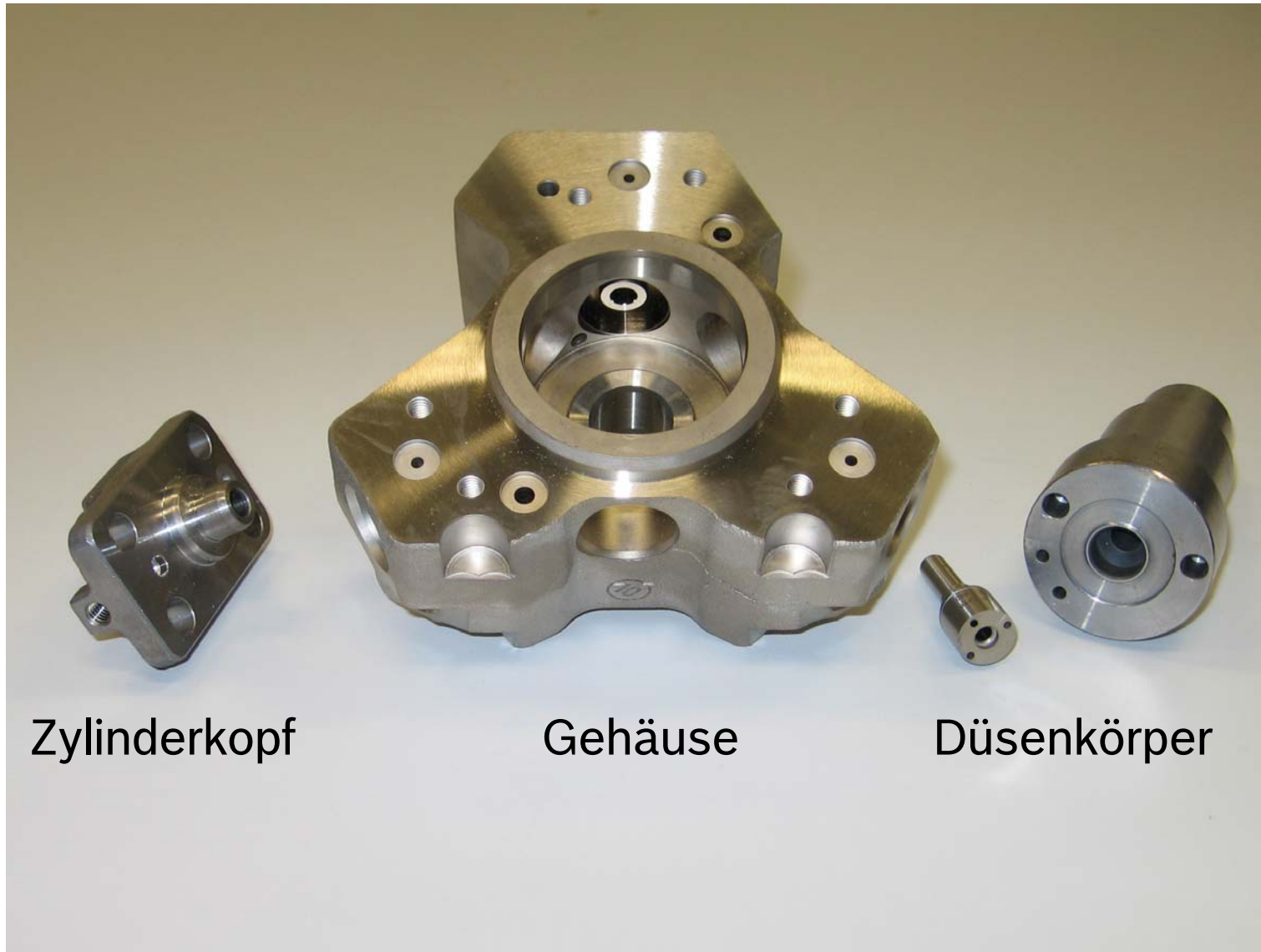
Aufkohlungsdauer: 300 s

Acetylenpartialdruck: 3,2 mbar

Durchsatz: 3 nl/h



## Verwertung - Bauteile



Zylinderkopf

Gehäuse

Düsenkörper

## Verwertung - Materialien

- 16MnCr5
- 20MnCr5
- 17CrNiMo6
- 18CrNi8



## Verwertung - Prozessauslegung

**Kommentar: Das Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis ist noch nicht implementiert**

**Eingabe**

Stahl: 16MnCr5

Grundkohlenstoffgehalt: 0.16 Ma%

Temperatur: 960 °C

Geometrie: Bohrung

Durchmesser: 0.002 m

Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis: 8

Case Hardening Depth ( CHD ): 0.6 mm

Oberflächen - Härte: 750

Minimale Anzahl an Pulsen: 2

Maximale Pulslänge: 300 s

Minimale Pulslänge: 60 s

**Ausgabe**

Kohlenstoffkonzentration an Oberfläche: 0 Ma%

Oberflächenhärte: 0 HV

CHD: 0 mm

**Pulse (s)**

	1	2	3	4	5
Aufkohlung	0	0	0	0	0
Diffusion	0	0	0	0	0
	6	7	8	9	10
Aufkohlung	0	0	0	0	0
Diffusion	0	0	0	0	0
	11	12	13	14	15
Aufkohlung	0	0	0	0	0
Diffusion	0	0	0	0	0

Rechnen Rücksetzen

CR/APM4-DOLLEY Copyright 2007

## Zusammenfassung

- Erfolgreiche Modellierung der gesamten Kohlenstoffübertragung  
gültig im Partialdruckbereich: 1,38 – 10 mbar  
Temperaturbereich: 850 – 1050 °C
- Die mathematische Beschreibung ist von der Thermowaage auf die Vakuumapparatur übertragbar
- Das Modell ist in der Lage die Aufkohlung von Bohrungen zu beschreiben
- Mit Hilfe des Modells können neue Prozesse ausgelegt bzw. existierende optimiert werden
- Die Methode zur Modellierung und Simulation der Unterdruckaufkohlung kann auf andere reaktive Prozessen übertragen werden

## Danksagung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# DAVE

Durchbruch der breiten Anwendung von  
Vakuumverfahren beim Einsatzhärten



Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH

Teilprojekt 1  
Kohlenstoffübertragung



**BOSCH**  
Robert Bosch GmbH

Teilprojekt 5



Prozessgase  
basi Schöberl GmbH & Co. KG

Teilprojekt 2  
Stoffübergang Adsorption  
Universität Erlangen-Nürnberg



Teilprojekt 6



Sensoren  
ZIROX Sensoren & Elektronik GmbH

Teilprojekt 3  
Pyrolyse  
Universität Karlsruhe, Engler-Bunte-Institut



Teilprojekt 7



Anwendung  
Wegener Härtetechnik GmbH

Teilprojekt 4  
Technische Abgasreinigung



Pall Corporation  
Pall Filtersystems GmbH  
Werk Schumacher Crailsheim



# BOSCH