

Regelung eines instationär betriebenen Festbettreaktors mit Fuzzy-Kontrollregeln

Dr.-Ing. **U. Nieken**, Ludwigshafen, Dipl.-Ing. **G. Koljos** und Prof. Dr.-Ing. **G. Eigenberger**, Stuttgart

Katalytische Abluftreinigung in Reaktoren mit periodischer Strömungsumkehr erlaubt einen autothermen Betrieb bis zu niedrigen Schadstoffkonzentrationen. Bei höheren Schadstoffkonzentrationen ermöglicht ein Mittenabzug die vollständige Auskopplung der Verbrennungswärme [3].

Aufgabe der Regelung ist es, den gezündeten Zustand bei geringen Rohgaskonzentrationen durch Zugabe von Stützgas aufrechtzuerhalten und bei höheren Konzentrationen Reaktionswärme in Form eines heißen Teilgasstromes zurückzugewinnen.

Ein konventioneller Reglerentwurf gestaltet sich in diesem Fall als schwierig, da der Reaktor keinen definierten Arbeitspunkt besitzt, sondern nur im gezündeten Zustand gehalten werden muß, wobei er sich aufgrund der direkten Kopplung von chemischer Reaktion und Wärmetausch stark nichtlinear verhält.

Aus diesem Grund werden die Methoden der Fuzzy-Regelung ausgewählt und an einem Reaktor im Labormaßstab erprobt. Im folgenden wird zunächst kurz auf das Prinzip der katalytischen Oxidation mit periodisch wechselnder Strömungsrichtung eingegangen, um die Wahl der Reglerein- und Ausgangsgrößen zu begründen. Anschließend werden der Aufbau des Fuzzy-Reglers skizziert und die erzielten Versuchsergebnisse diskutiert.

1 Aufgabenstellung

Zur Reinigung von kalten Abluftströmen mit Spuren an organischen Verunreinigungen werden zunehmend katalytische Festbettreaktoren eingesetzt, bei denen die Strömungsrichtung periodisch umgekehrt wird [3]. Diese zunächst von *Matros* [1, 5, 6] für die Schwefelsäureherstellung vorgeschlagene Fahrweise nutzt das Festbett sowohl als Regenerativ-Wärmetauscher als auch als Katalysatorträger. Gegenüber den konventionellen Verfahren, bei denen ein externer Wärmeübertrager und ein adiabater Festbettreaktor gekoppelt werden, ist durch den integrierten regenerativen Wärmetausch bereits bei sehr kleinen Zulaufkonzentrationen ein autothermer Reaktorbetrieb möglich. Wie bei allen autothermen Verfahren ist es auch hier notwendig, mit Hilfe einer Regelung Sorge zu tragen, daß der gezündete Zustand in Zeiten geringer Schadstoffzufuhr erhalten bleibt. Darüberhinaus soll während Zeiten eines hohen Schadstoffangebots die Reaktionswärme möglichst vollständig zurückgewonnen werden.

¹Dr. Ing. Ulrich Nieken, BASF-AG, Ludwigshafen, Dipl. Ing. Grigorios Koljos und Prof. Dr. Ing. Gerhart Eigenberger, Institut für Chemische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, Böblinger Str. 72, 7000 Stuttgart 1

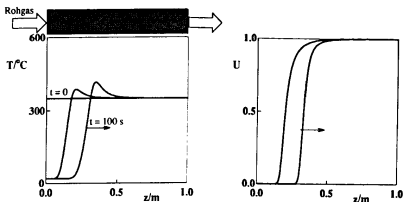


Abbildung 1. Temperatur- und Umsatzprofile zum Startzeitpunkt und 50 s bzw. 100 s nach dem Anströmen von links. $T'' = 20^\circ\text{C}$, $g'' = 0.1$ Gew-% Propan.

2 Prinzip des Verfahrens

Um in den gezündeten autothermen Betrieb zu gelangen muß der Reaktor zu Beginn auf ein Temperaturniveau vorgeheizt werden, bei dem das zu oxidierende Schadgas vollständig umgesetzt wird. Ist ein genügender Teil des Bettes auf Temperaturen oberhalb der Zündtemperatur des Schadgases aufgeheizt, wird der kalte Rohgasstrom in das Bett eingeleitet. Durch die im Festbett gespeicherte Wärme wird das Gas aufgeheizt und nach Erreichen hinreichend hoher Temperaturen oxidiert. Allerdings führt die Zufuhr des kalten Rohgases zu einer fortschreitenden Abkühlung des Bettanfangs und somit zu einer stetigen Verschiebung der Temperaturfront in Strömungsrichtung (Abb. 1).

Um ein Verlöschen zu vermeiden, wird die Strömungsrichtung umgekehrt solange noch genügend Wärme im Festbett gespeichert ist. Durch das nun von rechts einströmende kalte Gas bildet sich eine weitere Temperaturfront aus, die sich, zusammen mit der zuerst erzeugten Temperaturfront, nach links durch den Reaktor bewegt (Abb. 2). Nach einer größeren Anzahl von Strömungsumkehrungen stellt sich im Reaktor ein zyklisch stationärer („eingeschwungener“) Zustand ein (Abb. 3). Er ist dadurch gekennzeichnet, daß die während einer Periode freigesetzte Reaktionswärme gleich der vom Gas über den Reaktorrand abgeführten Wärme ist, so daß die Temperatur- und Umsatzprofile nach zwei aufeinanderfolgenden Umkehrungen der Strömungsrichtung identisch sind.

Abb. 3b zeigt den sägezahnförmigen Verlauf der Reaktoraustrittstemperaturen über der Zeit. Bei Anströmung von links nimmt die Temperatur am rechten Reaktorrand am Ende der Halbperiode ein Maximum an. Nach der Strömungsumkehr fällt die Temperatur rasch wieder bis auf die Zulauftemperatur ab. Das Integral des Wärmeabstrags über eine Periode entspricht im eingeschwungenen Zustand der während

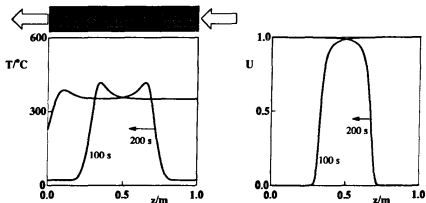


Abbildung 2: Temperatur- und Umsatzprofile zum Zeitpunkt der Strömungsumkehr nach 100 und 200 s.

einer Periode freigesetzten Reaktionswärme [3].

Die Umschaltung der Strömungsrichtung kann entweder durch Ventile und Klappen geschehen, oder, nach dem Prinzip der Ljungström Wärmetauscher, durch Rotation eines segmentierten Festbettes bei feststehendem Ein- und Auslauf. Der Drehwinkel entspricht in diesem Fall der Zeit nach der Strömungsumkehr.

Die nachfolgend dargestellten Experimente wurden an einer Anlage mit Ventilsteuerung durchgeführt. Das Anlagenschema ist in Abb. 4 dargestellt.

Kernstück der Anlage ist ein mit monolithischen Katalysatoren bestückter Reaktor, dem kalte Luft mit Spuren von Propan und/oder Propylen zugeführt werden. Für die Wärmerückgewinnung kann ein heißer Teilgasstrom aus der Reaktormitte entnommen werden. Zur Analytik stand ein CO-Meßgerät und ein Flammenionisationsdetektor zur Verfügung. Das Temperaturprofil wurde an 14 Stellen durch Thermoelemente vermessen. Die unvermeidlichen Wärmeverluste konnten nur zum Teil durch eine Begleitheizung kompensiert werden, um Rückwirkungen der Heizung auf das Reaktorverhalten auszuschließen.

3 Auswahl von Reglerein- und -ausgangsgrößen

Bei der katalytischen Abluftreinigung sind Störungen insbesondere durch Schwankungen von Konzentration und Zusammensetzung des Rohgases zu erwarten.

Anstelle der Rohgaskonzentration g_i^0 wird im folgenden die adiabate Temperaturerhöhung $\Delta T_{ad,i}$ jeder Schadstoffkomponente des Gasstromes bei vollständiger Oxidation angegeben:

$$\Delta T_{ad,i} = \frac{(-\Delta h_{r,i})/M_i \cdot g_i^0}{c_p c} \quad (1)$$

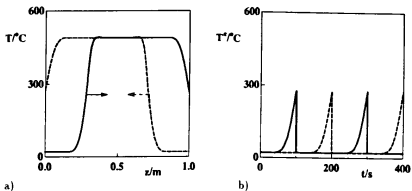


Abbildung 3: Temperaturprofile im periodisch stationären Zustand unmittelbar vor Strömungsumkehr (a) und zeitlicher Verlauf der Austrittstemperaturen (b).

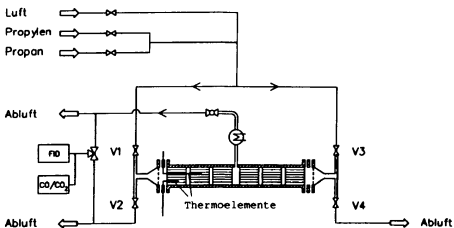


Abbildung 4: Das Schema der Versuchsanlage

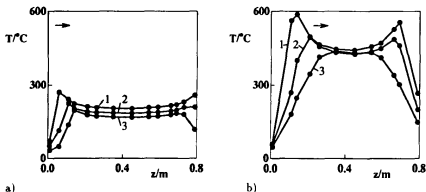


Abbildung 5: Temperaturprofile im eingeschwungenen Zustand bei der Propylenoxidation (a) und der Propanoxidation (b).
 1: $\Delta T_{ad} = 120 \text{ K}$, 2: $\Delta T_{ad} = 70 \text{ K}$, 3: $\Delta T_{ad} = 30 \text{ K}$. o Temperaturmessstelle

Abb. 5 zeigt gemessene Temperaturprofile im eingeschwungenen Zustand unmittelbar vor Strömungsumkehr bei der Propylenoxidation (linkes Bild) und der Propanoxidation (rechtes Bild). Mit zunehmender Schadstoffkonzentration steigt, wie erwartet, die Maximaltemperatur an und die Temperaturfronten werden steiler. Bei gleichem Energieinhalt des Rohgases, d.h. gleicher adiabater Temperaturerhöhung, führt die Oxidation von Propan zu Reaktortemperaturen, die $200 \text{ }^\circ\text{C}$ über denen der Propylenoxidation liegen. Die Maximaltemperatur hängt also nicht nur vom Brennwert des Rohgases, sondern auch entscheidend von der Kinetik der Reaktion ab [3]. Sind beide Komponenten im Rohgas vorhanden, können drei stabile zyklisch stationäre Reaktorzustände existieren [7].

Bei einem Wechsel der Schadstoffzusammensetzung kann es, trotz konstantem Heizwert des Rohgases zu einem Absinken der Maximaltemperatur unter die Zündgrenze der Propanoxidation kommen. So bewirkt in Abb. 6 die sprungförmige Änderung der Zulaufzusammensetzung, ausgehend vom eingeschwungenen Zustand mit hohem Propananteil zu einem Rohgas mit wenig Propan und hohem Propylenanteil, ein langsames Absinken der Reaktortemperaturen. Die zudosierte Propanmenge entsprechend einer adiabaten Temperaturerhöhung von 12 K reicht nicht zur Erhaltung des oberen gezündeten Betriebspunktes aus, so daß das Temperaturprofil auf das Niveau der reinen Propylenoxidation abfällt und Propan unreakiert durchbricht.

Daraus folgt, daß der Gesamt-C-Gehalt im Zulauf, der sich online näherungsweise mit einem Flammenionisationsdetektor bestimmen ließe, als charakteristische Regelgröße nicht in Betracht kommt. Die Messung der Reingaskonzentration ist als Reglereingangsgröße ebenfalls ungeeignet. Zum einen wird eine vollständige Oxidation angestrebt, so daß nur sehr kleine Regelabweichungen zugelassen werden können. Zum anderen kann der Fall eintreten, daß die Rohgaskonzentrationen der Schadstoffe auf null absinken, worauf der Reaktor ohne Stelleingriff verlöscht. Außerdem zeigt das Beispiel in Abb. 6, daß die Zulaufkonzentration der am schwersten

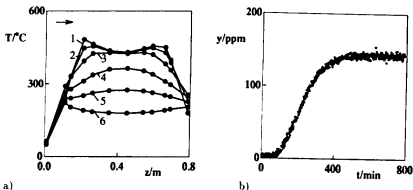


Abbildung 6: Übergangverhalten des Reaktors nach einem Sprung in der Rohgaszusammensetzung von 70 K Propan, 0 K Propylen zu 12 K Propan und 58 K Propylen.

- a) Temperaturprofil im eingeschwungenen Zustand bei $\Delta T_{ad}(\text{Propan}) = 70 \text{ K}$ (1) und (2) nach 7 min, (3) nach 17 min, (4) nach 170 min, (5) nach 370 min nach dem Wechsel der Rohgaszusammensetzung. (6) neuer eingeschwungener Zustand.
 b) Verlauf des FID-Signals über der Zeit (Kalibrierung mit Propan)

oxidierbaren Komponente nicht zu klein werden darf, weil sich sonst eine niedrigere Maximaltemperatur einstellt, bei der dieser Schadstoff nicht mehr umgesetzt werden kann.

Daraus folgt, daß stets eine solche Maximaltemperatur im Reaktor aufrecht erhalten werden muß, daß der am schwersten oxidierbare Schadstoff noch sicher umgesetzt werden kann, sobald er im Zulauf vorhanden ist.

Die erste Regelgröße ist somit diese Maximaltemperatur. Sie läßt sich nur dadurch wirtschaftlich einstellen, daß ein Stützgas mit einer vergleichbaren oder etwas höheren Zündtemperatur eingesetzt wird. Diese Stützgaszufuhr stellt somit die entsprechende Stellgröße dar.

Am Temperatur- und Umsatzverlauf von Abb. 6 wird deutlich, daß die Stützgaszufuhr spätestens nach 100 min einsetzen müßte, um den Vollumsatz von Propan aufrechtzuerhalten.

3.1 Mittenabzug

Die im Ablaufstrom des Reaktors als fühlbare Wärme gespeicherte Reaktionsenthalpie kann wegen der im Mittel niedrigen und stark schwankenden Ablauftemperatur (Abb. 3b) meistens nicht weiter genutzt werden. Zur Energierückgewinnung auf hohem Temperaturniveau kann dagegen ein Teilgasstrom in der Reaktormitte abgezogen werden [2]. Abb. 7 zeigt das eingeschwungene Temperaturprofil mit und ohne Mittenabzug. Durch den Mittenabzug kontrahiert das Temperaturprofil und

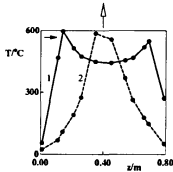


Abbildung 7: Einfluß des Mittenabzuges auf das Temperaturprofil. Eingeschwungener Zustand ohne (1) und mit 20 % Gasabzug aus der Reaktormitte (2). $\Delta T_{ad} = 120$ K. Propanoxidation.

die Reaktoraustrittstemperatur sinkt auf das Niveau der Zulufttemperatur ab. Ist die Zone hoher Temperatur in der Reaktormitte breit genug, so wird im Mittenabzug gereinigte Luft abgezogen, und die Reaktionswärme vollständig als heißer Teilgasstrom zurückgewonnen. Allerdings kann Vollumsatz aller Komponenten bei Betrieb mit Mittenabzug nicht mehr durch Einhaltung einer Maximaltemperatur allein gewährleistet werden, da die Strecke, auf der Maximaltemperatur herrscht, stark von dem Anteil des Mittenabzuges abhängt. Für die Regelung ist daher eine weitere Eingangsgröße notwendig.

3.2 Geschätzter Umsatz der Reaktion

Um den vollständigen Umsatz aller Komponenten zu gewährleisten, muß das Gas hinreichend lange in einem Bereich hoher Temperaturen verweilen. Wie hoch die Temperaturen sein müssen, wird maßgeblich durch die Reaktionsgeschwindigkeit der am schwersten zu oxidierenden Komponente bestimmt. Im folgenden wird der Umsatz dieser am schwersten oxidierbaren Komponente aus dem gemessenen Temperaturprofil über der Schüttungslänge abgeschätzt und der geschätzte Umsatz als weitere Reglereingangsgröße benutzt.

Dazu wird für diese Komponente von einer Reaktion 1. Ordnung ausgegangen. Stoßfaktor k^∞ und Aktivierungsenergie E müssen in getrennten Versuchen vorab bestimmt werden. Die Massenbilanzen für diese Komponente in Feststoff und Gas sind im Vergleich zur Energiebilanz quasistationär und lauten (eindimensionales Zweiphasenmodell):

$$\beta \cdot a_v \cdot (c - c^*) = a_v \cdot k^\infty \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot c^* \quad (2)$$

$$\frac{\dot{m}}{A} \cdot \frac{dg_i}{dz} = -M_i \cdot \beta \cdot a_v \cdot (c_i - c_i^*) \quad (3)$$

Mit den Umrechnungen

$$c_i = g_i \cdot \frac{\rho_G}{M_i} \quad , \quad \rho_G = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \approx \frac{p \cdot M_L}{R \cdot T} \quad , \quad k(T) = k^\infty \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

läßt sich Gl. 2 nach c^* auflösen und in Gl. 3 einsetzen. Durch Integration über die Reaktorlänge läßt sich der Endumsatz $U' = 1 - g'/g^0$ wie folgt aus dem Temperaturprofil im Reaktor berechnen:

$$U' = 1 - \exp\left(-a_i \cdot \frac{A}{\dot{m}} \cdot \int_{z=0}^{z=L} \frac{M_L \cdot p}{R \cdot T(z)} \cdot \frac{k(T(z)) \cdot \beta}{k(T(z)) + \beta} dz\right) \quad (4)$$

Interpoliert man aus den gemessenen Reaktortemperaturen ein Temperaturprofil $T(z)$, so läßt sich bei bekanntem Stofffaktor k^∞ und Aktivierungsenergie E eine Schätzung für den Umsatz der am schwersten zu oxidierenden Komponente durchführen.

Im Laborreaktor wurden die Parameter k^∞ und E identifiziert, indem von einem stabilen gezündeten Propanbetrieb die Zulaufkonzentration von Propan soweit abgesenkt wurde, daß die Wärmefreisetzung nicht mehr zum Erhalt des gezündeten Zustandes ausreichte. Abb. 8 zeigt die Temperaturprofile zu verschiedenen Zeitpunkten und den zeitlichen Verlauf von Maximaltemperatur und Austrittskonzentration. Während die Maximaltemperatur zunächst sehr schnell absinkt, kommt es erst nach ca. 5 Stunden zum Durchbruch des Schadstoffes. Mit Hilfe der gemessenen Temperaturprofile und Gl. 4 wurden die Parameter der Reaktionsgeschwindigkeit an den gemessenen Umsatzverlauf angepaßt.

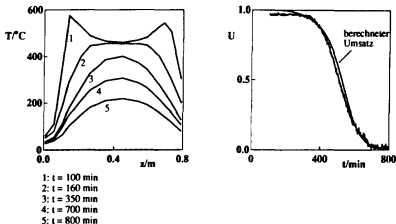


Abbildung 8: Zur Parameteranpassung für die Umsatzschätzung.

links: die gemessenen Temperaturprofile

rechts: gemessener und durch Anpassen von k^∞ und E berechneter Umsatz

An dieser Stelle sei angemerkt, daß auch eine grobe Approximation der Reaktionskinetik für die nachfolgend dargestellte Regelung ausreicht, da mit Hilfe der so ermittelten Reaktionskinetik lediglich der Temperaturverlauf im Reaktor bewertet (gewichtet) wird.

4 Der Fuzzy-Regler

Mit den beiden Eingangsgrößen Maximaltemperatur und geschätztem Umsatz läßt sich der Zustand des Reaktors charakterisieren. Ziel ist es, möglichst sparsam Stützgas zu dosieren und, wenn möglich, Reaktionswärme in Form eines heißen Seitenstromes zurückzugewinnen. Im Gegensatz zu vielen konventionellen Regelaufgaben ist es aber nicht Aufgabe der Regelung, einen genau definierten Zustand im Reaktor einzustellen, vielmehr soll lediglich der gezündete Zustand erhalten bleiben und ggf. ein Optimum an Reaktionswärme ausgekoppelt werden.

Wegen dieser nur qualitativ zu begründenden Anforderungen der Regelungsaufgabe lag es nahe, mit der Fuzzy-Regelung ein auf qualitativer Bewertung beruhendes Regelungskonzept einzusetzen.

Übliches Vorgehen beim Entwurf eines Fuzzy-Reglers ist die Definition von Regel- und Stellgrößen als „linguistische Variable“ und die Beschreibung der Regelaufgabe durch verbale Kontrollregeln [8].

Als Eingangsgrößen dienen die Maximaltemperatur und der geschätzte Umsatz bzw. dessen zeitliche Änderung, als Stellgrößen der Stützgasstrom und der abgezogene Seitenstrom bzw. deren Änderungen.

Für den Regler wurden somit folgende linguistische Variablen gewählt:

Maximaltemperatur	(T_{max})
Abweichung vom Sollumsatz	(ΔU)
Änderung der Stützgasmenge	(ΔST)
Änderung des Seitenstromes	(ΔM)

Die Ein- und Ausgangsgrößen werden für die Fuzzy-Regelung zunächst auf einen Bereich von (-10 bis +10) normiert, wobei dieser Bereich fünf verschiedenen Ausprägungen (PB positiv big, PS positiv small, Z zero, NS negative small, NB negative big) der linguistischen Variablen zugeordnet wird. Die Festlegung auf fünf Ausprägungen pro linguistischer Variable ist dabei willkürlich und wurde aus [9] übernommen.

Die Regelungsaufgabe wird nun in sogenannten Kontrollregeln hinterlegt. In diesem Fall wurden zwei Regelsätze (für Stützgas und Mittenabzug) mit je 25 Regeln (2 Eingangsgrößen \times 5 Ausprägungen) aufgestellt.

Beispielhaft sei die folgende Regel herausgegriffen:

Wenn die Maximaltemperatur sehr groß ist (PB) und der Umsatz geringfügig zunimmt (PS) dann soll der Mittenabzug stetig um einen kleinen Faktor vergrößert werden (PS).

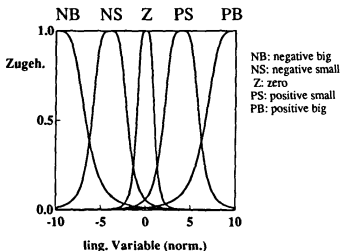


Abbildung 9: Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgrößen

In formaler Schreibweise:

Wenn $((T_{max} = PB)$ und $(\Delta U = PS))$ dann $(\Delta M = PS)$

Diese Regel beschreibt einen integrierenden Regler für die Stellgröße Mittenabzug.

Um die Regeln auswerten zu können, müssen zunächst die Zugehörigkeiten der linguistischen Variablen zu den Ausprägungen festgelegt werden. Eine hier benutzte Zuordnung ist in Abb. 9 dargestellt. Sie folgt aus einem Vorschlag von [4], nach dem die Zugehörigkeiten der Eingangsgrößen durch folgende Funktionen beschrieben werden

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + (a(x - c))^b}$$

Der Parameter c verschiebt das Maximum der Funktion, ein großer Wert von a zieht die Wendepunkte näher an das Maximum, b ändert die Steilheit der Flanken.

Abb. 9 zeigt die Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingänge. Ein normierter Wert der Maximaltemperatur von +9 ergibt, wie aus Abb. 9 abzulesen, eine Zugehörigkeit zu PB von 0.99 und zu PS von 0.025.

Die Zuordnung der Ausprägungen zu den entsprechenden Werten der Ausgangsgrößen (Änderung Stützgasmenge, Änderung Seitenstrom) erfolgte über Dreiecksfunktionen.

Für die Verknüpfung von linguistischen Variablen wurde der Minimum-Operator für die „und“-Verknüpfung und der Maximum-Operator für die „oder“-Verknüpfung gewählt. Ist also die Aussage „ $(T_{max} = PB)$ “ zu 0.9 erfüllt und „ $(\Delta U = PS)$ “ zu 0.5, dann ist die Aussage „ $(T_{max} = PB)$ und $(\Delta U = PS)$ “ zu 0.5, die Aussage „ $(T_{max} = PB)$ oder $(\Delta U = PS)$ “ zu 0.9 erfüllt.

In der Fuzzy-Logic geht man nun davon aus, daß die Schlußfolgerung einer Regel zum gleichen Grad erfüllt ist wie die Vorbedingung, d.h. im o.a. Beispiel ist die Schlußfolgerung „ $\Delta M=PS$ “ zu 0.5 erfüllt. Durch Auswertung weiterer linguistischer Variabler wird jeder Ausprägung der linguistischen Ausgangsvariablen ein Erfülltheitsgrad zugeordnet. Damit ergibt sich beispielsweise $\mu(\Delta M=PS) = 0.5$, $\mu(\Delta M=PB) = 0.1$, $\mu(\Delta M=Z) = 0.1$ etc. Nun muß dieser unscharfen Menge wieder ein realer Zahlenwert der Ausgangsgröße zugeordnet werden. Dazu wird jede Ausprägung der Ausgangsgröße mit ihrem Erfülltheitsgrad multipliziert, so daß eine gewichtete Fläche resultiert (Abb. 10). Dieser Schritt wird als Inferenz bezeichnet. Aus dieser gewichteten Fläche muß nun noch ein konkreter Wert ausgewählt werden, beispielsweise die Abszisse des Flächenschwerpunktes. Man spricht dabei von Defuzzifizierung.

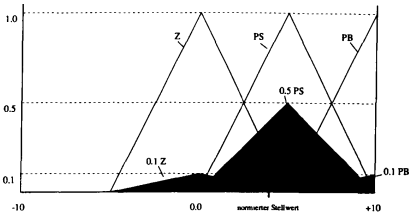


Abbildung 10: Zur Bestimmung der Ausgangsgröße („normierter Stellwert“) durch Inferenz und Defuzzifizierung

Ziel ist auch hier nur, daß das als intuitiv „vernünftig“ empfundene Vorgehen zutreffend wiedergegeben wird.

5 Versuchsergebnisse

Die nachfolgend dargestellten Versuche basieren auf einer Regelbasis, die aufgrund allgemeiner Betriebserfahrung aufgestellt und nicht weiter optimiert wurde.

Als Störgröße wurde die Propankonzentration im Zulauf entsprechend Abb. 11 variiert. Auf eine Zudosierung von Propylen wurde verzichtet, da Propylen das Temperaturprofil kaum verändert, solange Propan sicher oxidiert werden kann (siehe Abb. 6). Ein Schadstoffstrom von 10 g/h Propan ($= 80 \text{ K } \Delta T_{ad}$) reicht für einen autothermen Reaktorbetrieb aus, erlaubt aber keine zusätzliche Wärmeabfuhr. Bei 20 g/h ($\Delta T_{ad} = 160 \text{ K}$) kann ein heißer Seitenstrom abgezogen werden.

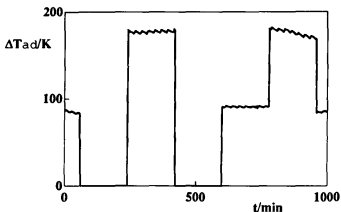


Abbildung 11: Verlauf der Störgröße (Propankonzentration)

Abb. 12 zeigt den Verlauf der Maximaltemperatur, die Ausgangskonzentration und den zeitlichen Verlauf der Stellgrößen Stützgasinspeisung und Mittenabzug. Die sprungförmige Absenkung der Rohgaskonzentration auf Null nach 60 min wird durch Zugabe von Stützgas (Propan) ausgeregelt. Die Maximaltemperatur bleibt bei etwa 500 °C, und die Austrittskonzentration liegt unter 5 ppm Propanäquivalente. Etwas unbefriedigend ist die Oszillation der zugegebenen Stützgasmenge, die sich auch in kleinen Oszillationen der Maximaltemperatur wiederfindet.

Nach einem starken Anstieg der Schadstoffkonzentration schließt das Stützgasventil und mit einer leichten Verzögerung öffnet sich der Mittenabzug. Damit geht einerseits ein Zusammenziehen des Temperaturprofils einher (siehe Abb. 7), andererseits steigt die Maximaltemperatur aufgrund der großen Zulaufkonzentration an.

Ein erneutes Absinken der Rohgaskonzentration bei einem schmalen und hohen Temperaturprofil im Reaktor (der Mittenabzug ist geöffnet) führt zu einer geringeren Stützgaszugabe solange die Maximaltemperatur und damit auch der geschätzte Umsatz hoch sind.

Nach einem Anstieg der Propanmenge auf 10 g/h ($\Delta T_{ad} = 80$ K) schließt die Stützgaszufuhr, ein weiterer Anstieg der Rohgaskonzentration führt zur erneuten Öffnung des Mittenabzugs.

Von zwei Messungen abgesehen bleibt die Austrittskonzentration während des Versuchs immer deutlich unter 10 ppm, das entspricht einem Umsatz von 99,9 %.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Regler ohne jegliches Tuning zufriedenstellend arbeitet, insbesondere was die Reingaswerte betrifft. Lediglich die Stützgasdosierung bedarf der Optimierung, um Schwankungen der Stellgrößen zu vermindern.

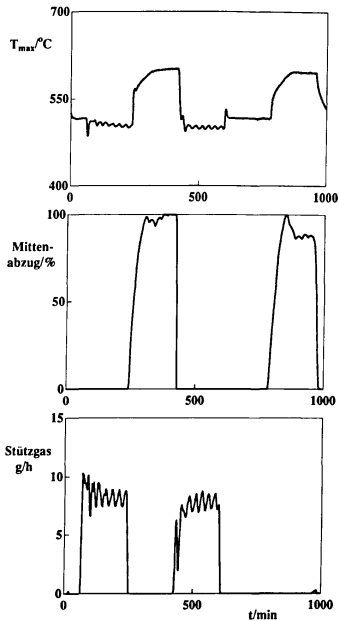


Abbildung 12: Verlauf der Maximaltemperatur (oben), des Mittensabzuges (Mitte) und der Stützgas einspeisung (unten) bei Störung gemäß Abb. 11.

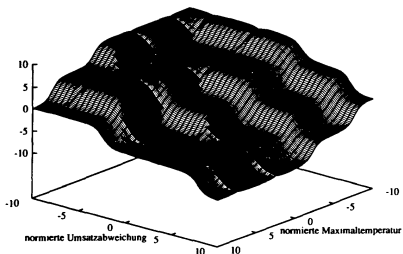


Abbildung 13: Die Kennfläche der Stellgröße Stützgas einspeisung über den normierten Eingangsgrößen

5.1 Monotonie

In dem hier vorgestellten Beispiel verstellen zwei Eingangsgrößen, der geschätzte Umsatz und die Maximaltemperatur in Form einer Kennfeldregelung, zum einen die Stützgaszufuhr zum andern den Mittenabzug. Bei einer derart einfachen Konstellation kann die durch die linguistischen Regeln definierte Kennfläche direkt dargestellt werden. Abb. 13 zeigt die Änderung des Stützgasstromes als Funktion der Eingangsgrößen. Wie erwartet ergibt sich ein nichtlinearer Zusammenhang mit - bedingt durch die Form der Zugehörigkeitsfunktionen - runden Übergängen. Zunächst überraschend ist aber, daß die so definierte Kennfläche nicht monoton ist, sondern Einschnitte aufweist. Der Grund dafür soll an einem einfachen Beispiel aufgezeigt werden.

Angenommen man hat für ein System mit einem Eingang E und einem Ausgang A die folgenden drei Regeln definiert:

$$\begin{array}{lll}
 (E=NB) & \longrightarrow & (A=Z) \quad \text{Regel 1} \\
 (E=Z) & \longrightarrow & (A=PB) \quad \text{Regel 2} \\
 (E=PB) & \longrightarrow & (A=PB) \quad \text{Regel 3}
 \end{array}$$

mit den in Abb. 14 dargestellten Zugehörigkeitsfunktionen.

Für den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen könnte man erwarten, daß der Ausgang gleich null ist (Z zero), falls der Eingang klein ist (NB negativ big) und bei größeren Werten die Ausgangsgröße zunimmt (Regel 2, Regel 3).

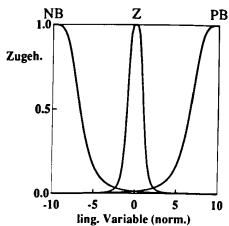


Abbildung 14: Zugehörigkeitsfunktionen

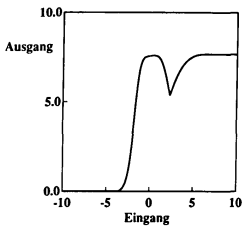


Abbildung 15: Kennlinie der Ausgangsgröße

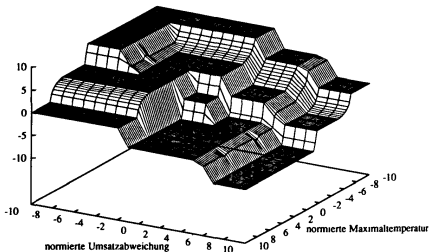


Abbildung 16: Kennfläche der Stellgröße Stützgaszufuhr über den normierten Eingangsgrößen bei trapezförmigen Zugehörigkeitsfunktionen

Tatsächlich ergibt sich der in Abb. 15 dargestellte Zusammenhang mit einem relativen Minimum bei 2, also zwischen Z (zero) und PB (positiv big). Grund für dieses Minimum ist, daß im Bereich der Eingangsgröße zwischen 2 und 4 weder Regel 2 noch Regel 3 in hohem Maße erfüllt sind und Regel 1 daher das Gesamtergebnis beeinflusst.

Um derartige Überlagerungen sicher zu vermeiden, kann man entweder nur lokal definierte Zugehörigkeitsfunktionen benutzen (Abb. 16) oder versuchen beim Aufstellen der Regeln sorgfältiger vorzugehen. Abb. 17 zeigt das Kennfeld für die Stützgasdosierung basierend auf einem modifizierten Regelsatz mit nur 14 Regeln.

Generell ist darauf zu achten, daß immer eine oder wenige Regeln dominieren sollten. Ferner sollten Nichtlinearitäten besser in den Regeln als in den Zugehörigkeitsfunktionen hinterlegt werden.

6 Zusammenfassung

Der sichere Betrieb eines autothermen Festbettreaktors für die katalytische Abluftreinigung erfordert ein Regelungskonzept, das ein Verlöschen des Reaktors oder die Einstellung eines mittleren Betriebszustandes, bei der eine schwer oxidierbare Komponente nicht mehr vollständig umgesetzt werden kann, sicher vermeidet.

Im vorliegenden Beispiel sollte zusätzlich, wann immer möglich, überschüssige Reaktionswärme als heißer Mittenabzug ausgekoppelt werden.

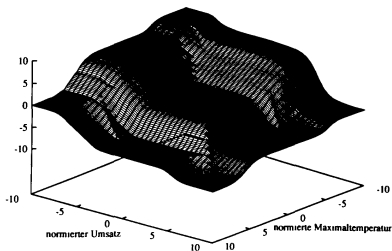


Abbildung 17: Kennfläche der Stellgröße Stützgaszufuhr über den normierte , Eingangsrößen bei modifiziertem Regelsatz

Es zeigte sich, daß diese Aufgabe erfüllt werden kann, wenn als Regelgrößen die Maximaltemperatur sowie der aus dem aktuellen Temperaturprofil berechenbare fiktive Umsatz der am schwersten oxidierbaren Komponente gewählt werden. Stellgrößen sind die Stützgaszufuhr, solange dieser Umsatz nicht ohne zusätzliche Energiezufuhr sichergestellt werden kann, sowie der Mittenabzug, falls ein Überschuß an Reaktionswärme vorliegt.

Da beide Stellgrößen direkt auf eine Strecke mit großen Zeitkonstanten wirken, kann eine integrierende Regelung vorgesehen werden. Ihre Auslegung gestaltet sich jedoch als schwierig wegen der stark nichtlinearen Verkopplung, der möglichen Überlappung beider Stelleingriffe und der Tatsache, daß kein fester Arbeitspunkt eingestellt sondern nur ein qualitativ formuliertes Ziel erreicht werden soll.

Daher wurde eine Kennfeld-Regelung mit Hilfe von Fuzzy-Kontrollregeln entworfen und an einer Versuchsanlage erprobt. Dabei zeigte sich, daß sich schon mit einfachen Strukturen und Kontrollregeln befriedigende Ergebnisse erzielen lassen. Die weitgehend heuristische Vorgehensweise erlaubt ein einfaches Umsetzen von Erfahrungswissen in Kontrollregeln. Allerdings ist es erforderlich und bei nicht zu komplexen Systemen auch gut durchführbar, die erhaltenen Kennflächen der Stellgrößen auf Konsistenz und Stetigkeit zu überprüfen.

Formelzeichen

A	m^2	Reaktorquerschnitt
a_v	$m^2/m^3_{Reaktor}$	spezifische geometrische Oberfläche
c	$kmol/m^3$	Konzentration
c_{pG}	$kJ/(kg K)$	spezifische Wärmekapazität des Gases
E	$kJ/kmol$	Aktivierungsenergie
g		Massenanteil
Gz	$kg/(m^2 s)$	Querschnittsbelastung
Δh_r	$kJ/kmol$	Reaktionsenthalpie
k^∞	m/s	Stoßfaktor
k	m/s	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
L	m	Katalysatorbettlänge
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	$kg/kmol$	molare Masse Schadstoff
M_L	$kg/kmol$	molare Masse Luft
p	Pa	Druck
R	$kJ/(kmol K)$	allgemeine Gaskonstante
r	$kmol/(m^2 s)$	Reaktionsgeschwindigkeit, bezogen auf die äußere geometrische Oberfläche
T	$K, ^\circ C$	Temperatur
ΔT_{ad}	$K, ^\circ C$	adiabate Temperaturerhöhung
U		Umsatz
z	m	axiale Ortskoordinate
β	m/s	Stoffübergangskoeffizient
μ		Zugehörigkeit
ρ_G	kg/m^3	Dichte Gas
e	Index	Reaktorende
i	Index	Stoff
o	Index	Reaktoreintritt
$*$	Index	Katalysatoroberfläche

Literatur

- [1] G.K. Boreskov und Y. S. Matros. *Unsteady-state performance of heterogeneous catalytic reactions*. Catal. Rev.-Sci. Eng., 25(4):551-590, 1983.
- [2] G. Eigenberger und U. Nieten. *Catalytic combustion with periodic flow reversal*. Chemical Engineering Science, 42:2109-2115, 1988.
- [3] G. Eigenberger und U. Nieten. *Katalytische Abluftreinigung: Verfahrenstechnische Aufgaben und neue Lösungen*. Chemie Ingenieur Technik, 63(8):781-791, 1991.

- [4] W. J. M. Kickert und H. R. Van Nauta Lemke. *Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant*. Automatica, 12:301 ff., 1976.
- [5] Y. S. Matros. *Unsteady-state oxidation of sulphur dioxide for sulphuric acid production*. Sulphur, (183):23-29, 1986.
- [6] Y. S. Matros. Catalytic processes under unsteady-state conditions, Band 43 von *Studies in Surface Science and Catalysis*. Elsevier, 1989.
- [7] U. Nieken. *Abluftreinigung in katalytischen Festbettreaktoren bei periodischer Strömungsumkehr*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1993.
- [8] Thomas Tilli. *Automatisierung mit Fuzzy-Logic*. Franzis-Verlag, 1992.
- [9] Y. Yamashita, S. Matsumoto und M. Suzuki. *Start-Up of a Catalytic Reactor by Fuzzy Controller*. Journal of Chemical Engineering of Japan, 21(3):277 ff., 1988.