

ENTWICKLUNG VON STRATEGIEN ZUR TEMPERATURREGELUNG FÜR SOFC-STACKS UND SOFC-MODULE

Richard Vogt

Grundlagen und Ziele

Im Sinne der Energiewende haben sich sowohl Brennstoffzellen als auch Elektrolyseure zunehmend in der industriellen Standardrepertoire etabliert. Beim Betrieb von Brennstoffzellen des Typs SOFC (Festoxid-Brennstoffzellen) werden dabei aufgrund des hohen Temperaturniveaus von über 800 °C besondere Anforderungen an die Regelung der Temperatur gestellt. Um einen Ausfall der Anlage wegen Materialversagens zu vermeiden, ist sicherzustellen, dass eine Maximaltemperatur von 870 °C nicht überschritten wird, das heißt der Überschwinger sollte möglichst gering ausfallen. Trotzdem sollte die Regelung so scharf wie möglich reagieren, um so den trägen Charakter der thermischen Vorgänge auszugleichen.

Streckenanalyse

Im Kern der Anlage laufen verschiedene exotherme chemische Reaktionen ab, in erster Linie die Oxidation von Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Dies bringt prinzipiell einen nichtlinearen Charakter aufgrund der multivariablen Zusammenhänge und der vielen Quereinflüsse mit sich [1]. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt lediglich die Regelung der Temperatur, sodass eine Untersuchung der thermischen Strecke genügt. Dabei wird das System ausgehend von der Wärmestrombilanz charakterisiert:

$$\dot{Q}_{\text{Stack}} = P_{\text{Brenn}} - P_{\text{El}} - \dot{Q}_{\text{Wärmeverlust}}$$

$$\dot{T} \cdot C_{\text{Stack}} + T \cdot \frac{1}{R_{\text{th}}} = P_{\text{Heiz}} - P_{\text{Kühl}}$$

(gleiche Farbe kennzeichnet gleiche Terme)

K_S	τ	T_{Tot}
-0,023 K/W	1906 s	420 s

Tabelle 1: Streckenparameter

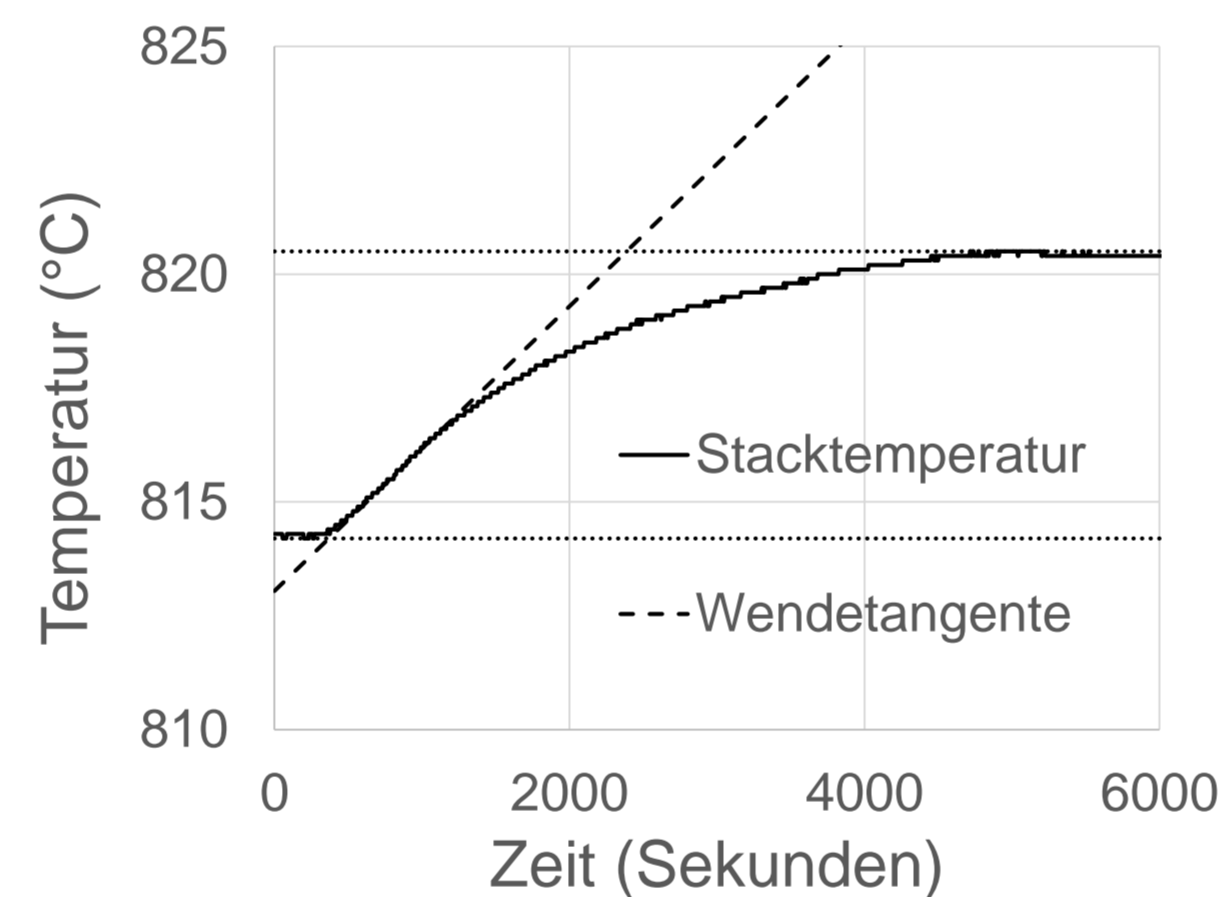


Bild 1: Sprungantwort der Regelstrecke

Die Regelstrecke wird anschließend auf ein lineares System zurückgeführt, indem die Kühlleistung als Stellgröße betrachtet wird. So ergibt sich die Strecke zu einem PT1-Glied mit Totzeit bzw. , nach Linearisierung, zu einem PT2-Glied. Die weitere Auswertung erfolgt aus der Sprungantwort per Wendetangentenverfahren (Bild 1).

Ergebnisse

Die Auswertung der Regelgüte erfolgte anhand der Reaktion der ausgelegten Regelkreise auf einen Sprung in Stör- und Führungsgröße. In Bild 5 ist zu erkennen, dass mit Hilfe der verwendeten PI-Regler eine zufriedenstellende Regelgüte erreicht werden kann. Zudem zeigte sich, dass die Kaskadenstruktur eine deutliche Verbesserung des Störverhaltens bei gleichbleibendem Führungsverhalten ermöglicht und somit ihr Einsatz sehr zu empfehlens ist.

Für beste Ergebnisse wird allerdings eine ganzheitliche modellprädiktive Regelung empfohlen, wie sie in der chemischen Industrie üblich ist.

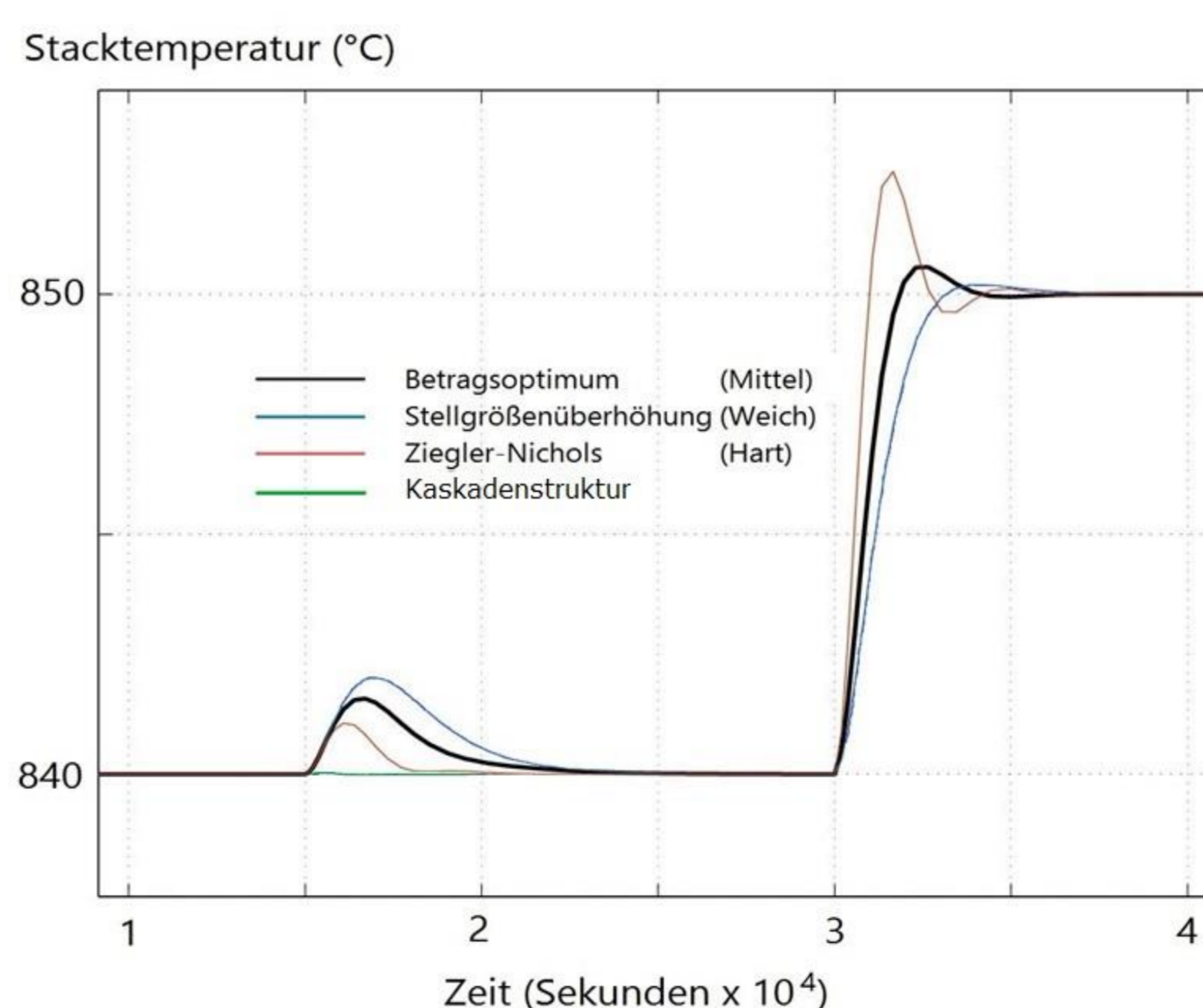


Bild 5: Stör- und Führungsverhalten der verschiedenen harten Regelkreise

Auslegung der Regelung

Der ermittelte Streckencharakter eines totzeitbehafteten PT1-Gliedes lässt sich mit Hilfe eines PI-Reglers beherrschen [2].

Die analytische und empirische Auslegung der Regler erfolgt in verschiedener Härte, auf Grundlage des Betragsoptimums. Bei diesem Verfahren wird ein optimales Übertragungsverhalten des geschlossenen Regelkreises von $G_{\text{RK}}(s) = 1$ für eine möglichst große Bandbreite realisiert (siehe Bild 2).

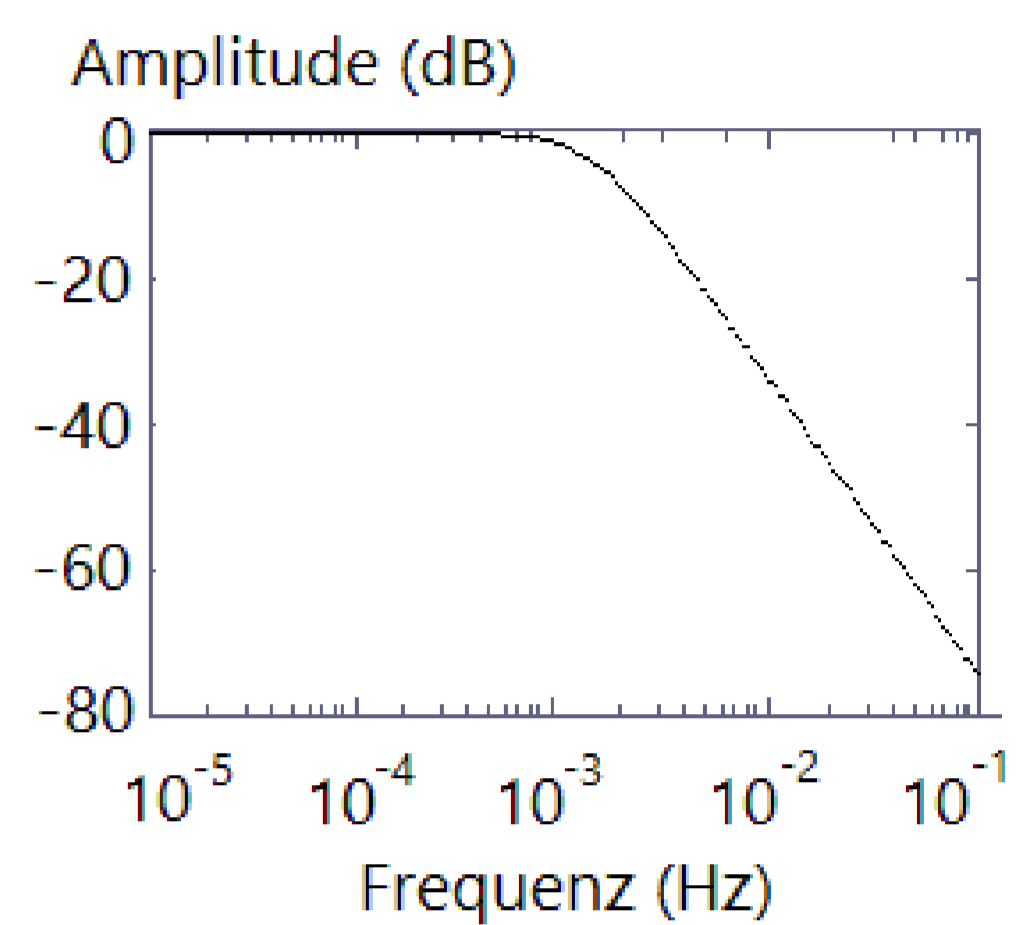


Bild 2: Amplitudengang des geschlossenen Regelkreises

Zudem bietet sich aufgrund des trägen Streckencharakters der Einsatz einer kaskadierten Reglerstruktur an, weil so einerseits bestimmte Störungen viel schneller ausgeglichen werden können und auch die Stellung der Kühlleistung viel einfacher realisiert wird. Andererseits ermöglicht der modularisierende Charakter der Kaskadenstruktur eine deutlich einfachere Entwicklung, Wartung und Fehlersuche der Regelung.



Bild 3: Signalfussplan des kaskadierten Regelkreises

Der Nachweis der Stabilität der ausgelegten Regelkreise gestaltet sich wegen der vorliegenden Totzeit schwierig, weil eine Linearisierung unzulässig ist und somit die meisten analytischen Verfahren ausscheiden. Darum erfolgt hier die Untersuchung am Bode-Diagramm des offenen Regelkreises [3]. Selbst bei der schärfsten Parametrierung, die in dieser Arbeit ausgelegt wurde, verbleibt eine positive Amplitudenreserve von 4,2 dB. Damit sind alle ausgelegten Regelkreise stabil.

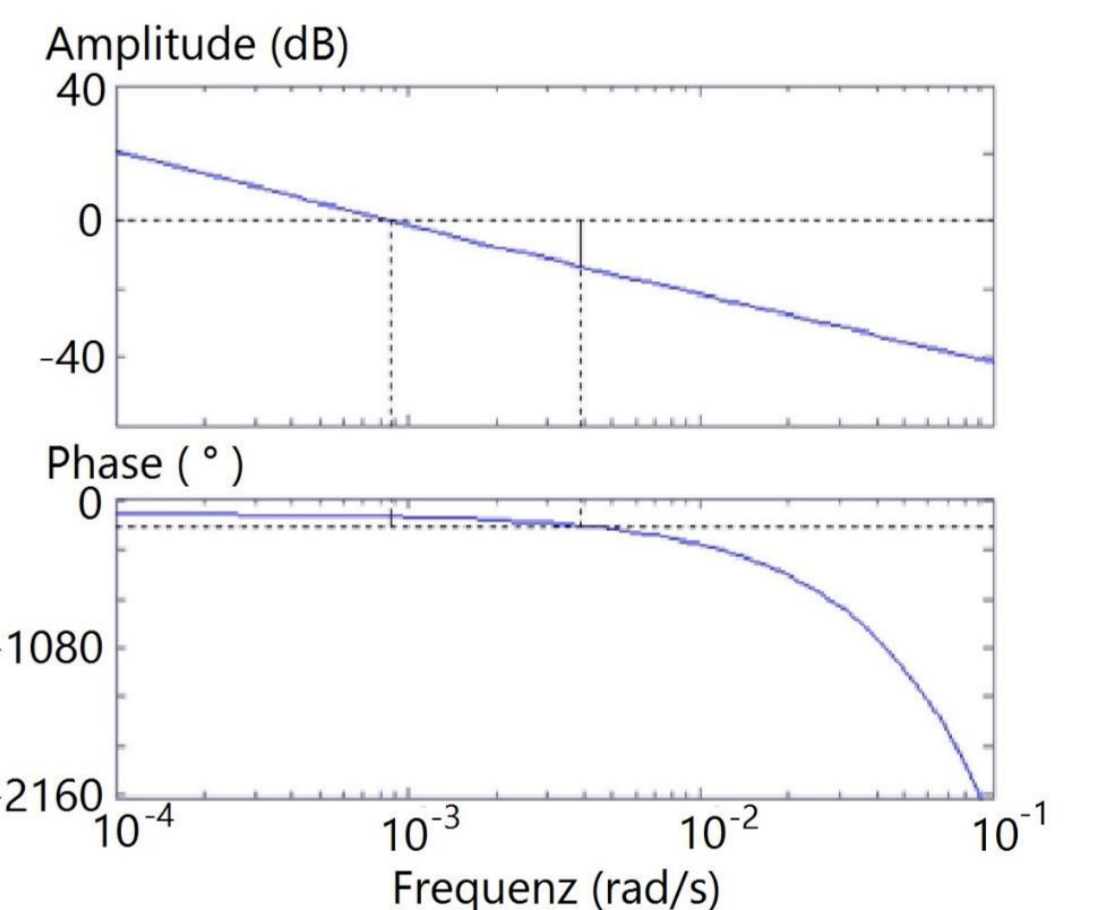


Bild 4: Bodediagramm des offenen Regelkreises

Bei der Untersuchung der Anlage fiel zudem auf, dass die Kühlluft als Stellgröße nicht verändert werden konnte, ohne gleichzeitig die Störgrößen zu beeinflussen. Dies lag an einer konstruktiven Kopplung zweier Luftströme, welche beide vom selben Lüfter gespeist wurden. Für bessere Bedienung und einen effizienteren Betrieb sollte dieses Problem unbedingt behoben werden, weil die Anlage im derzeitigen Zustand kaum regelbar ist. Eine leistungsfähige Regelung ist nur möglich, wenn die Stellgröße frei veränderbar ist. Darum wird empfohlen, die Kühlluft konstruktiv von den restlichen Luftströmen im System zu entkoppeln und separate Lüfter vorzusehen, um ungewünschte Quereinflüsse auszuschließen und die Stellgröße von den Störgrößen zu entkoppeln.

Publikationen

[1] James Larminie, Andrew Dicks, „Fuel Cell Systems Explained“, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., 2003

[2] A. Ecker, „VM Regelungstechnik“, Landshut, 2006

[3] H. Unbehauen, „Regelungstechnik III“, Vieweg, 6. Auflage, 2000