



# SynErgie

*Synchronisierte und energieadaptive  
Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung  
von Industrieprozessen auf eine fluktuierende  
Energieversorgung*

Schlussbericht Teilvorhaben:  
D0-2\_TU Berlin (03SFK3D0-2)

01.11.2019 – 30.06.2023

- Öffentlicher Teil -

Datum: 20.12.2023

**KOPERNIKUS**  
SynErgie **PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



Teil I: Kurze Darstellung .....	2
1 Aufgabenstellung .....	2
2 Voraussetzungen .....	2
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	3
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	4
6 Literaturverzeichnis .....	5

# Teil I: Kurze Darstellung

## 1 Aufgabenstellung

Die übergeordnete Aufgabe ist die Flexibilisierung von Luftzerlegungsanlagen. Nahezu der gesamte Energiebedarf dieser Anlagen muss für die Verdichtung der Luft in einem Haupt- bzw. Boosterkompressor aufgebracht werden. Dieser höchst relevante Prozessausschnitt, die Luftverdichtung, wird hier isoliert betrachtet. Um die gewünschte Flexibilisierung bei gleichzeitig hoher Effizienz, d.h. geringem Energiebedarf, zu erreichen, werden beim Industriepartner MAN Energy Solutions neuartige Radialverdichterstufen mit innovativen und aerodynamisch wirksamen Stellorganen entwickelt. Bis dato gibt es keine praktisch erprobte Regelungsstrategie unter Einbeziehung der neuen Stellorgane. In der ersten Förderphase des SynErgie-Projekts wurden hierzu Konzepte ausgearbeitet und in Simulationen untersucht. In dieser zweiten Förderphase gilt es nun, die theoretischen Arbeiten im Experiment zu evaluieren und das Prozessführungskonzept für den Einsatz in der industriellen Praxis auszurichten. Zu diesem Anlass wird vom Industriepartner MAN Energy Solutions im Rahmen des SynErgie-Projekts erstmalig eine solche, flexible Verdichterstufe gefertigt und in einem hauseigenen Prüfstand aufgebaut. Ein Großteil der hier beschriebenen Arbeiten umfasst die Software-seitige Vor- und Nachbereitung sowie die Durchführung der Experimente unter regelungstechnischen Aspekten. Der zweite große Teil beschäftigt sich mit dem Aufbau einer Überwachungsmethode. Hier soll ein moderner, modellbasierter Ansatz für die Überwachung nicht direkt messbarer Betriebsparameter für die betrachtete Anwendung entwickelt bzw. übertragen werden. Zu diesen Parametern zählt die Sicherheitsmarge zum kritischen Verdichterpumpen. Beim flexiblen Verdichter hat diese Betriebsgrenze multiple Abhängigkeiten, die in konventionellen Überwachungsansätzen und Pumpengrenzreglern nicht abgebildet sind. Hier muss ein geeignetes und trotz der Verkomplizierung echtzeitfähiges Konzept entwickelt werden, um den forcierten, flexiblen Betrieb sicher gestalten zu können.

Ein kleinerer Aufgabenteil besteht in der qualitativen, modellbasierten Analyse verschiedener Verdichterkonfigurationen hinsichtlich Flexibilität und Effizienz. Die Konfigurationen unterscheiden sich in ihrer konkreten Instrumentierung mit Eintrittsleitgittern und entsprechend in der Anzahl der zur Verfügung stehenden Stellorgane.

## 2 Voraussetzungen

Das Fachgebiet Regelungstechnik beschäftigt sich mit der Überwachung, Regelung und Optimierung von komplexen, nichtlinearen dynamischen Systemen. Zu den Anwendungsgebieten zählen neben Kompressoren unter anderem biotechnologische Prozesse, verteilte Systeme sowie medizintechnische Anwendungen. Das Fachgebiet war außerdem bereits in der ersten Förderphase des SynErgie-Projekts mit der regelungstechnischen Konzepterstellung für den flexiblen Verdichter betraut.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In grober Zusammenfassung sah der ursprüngliche Arbeitsplan vor, nach einem Jahr die ersten Experimente am einstufigen Prototypen vorbereitet und abgeschlossen zu haben. Diese ersten Experimente dienen der experimentellen Datenerhebung, welche für eine Modellvalidierung und ggf. -anpassung notwendig ist. Auf Basis der validierten, ggf. angepassten Modelle wird der Regler für eine zweite Versuchsreihe mit dann integriertem Regler synthetisiert. Das Ende der zweiten Versuchsreihe war für den Projektmonat 27 terminiert.

Durch notwendige Umbauten im Prüffeld bei MAN ES und Pandemie-bedingte Verzögerungen verschob sich die erste Versuchsreihe um etwa ein Jahr und die zweite Versuchsreihe um acht Monate auf Projektmonat 35. Durch unvorhergesehene Probleme mit einzelnen, aber relevanten Messsignalen bei der Datenerhebung im Prüffeld konnte das klassische Schema über Parameteridentifikation, Kreuzvalidierung und anschließender Reglersynthese nicht wie geplant durchgeführt werden. Die Kompensation fehlender (und Bereinigung gestörter) Signale gelang mit Hilfe der ersatzweise wesentlich weiterentwickelten, modellgestützten Überwachungsmethodik. Auf diese Weise konnte eine Autovalidierung der Modelle und auf dieser Basis eine Anpassung der Regelungsroutinen erfolgen. In der zweiten, verzögerten Versuchsreihe wurde der Regler erfolgreich erprobt. Neue Herausforderungen, die aus der ersten Versuchsreihe nicht ersichtlich waren, wurden durch umfangreiche, in Teil II und III dieses Berichts beschriebene Modifikationen bewältigt. Im Nachgang der Experimente wurde auch das Prozessführungskonzept für mehrstufige Verdichter überarbeitet und an die erfahrene Situation im industriellen Umfeld angepasst, wodurch die Robustheit und die Tauglichkeit des Ansatzes entscheidend erhöht werden konnten. Letztlich konnten die gesteckten Ziele trotz erheblicher Mehrarbeiten durch die Umstrukturierung erreicht werden.

In der anschließenden, außerordentlichen Laufzeit der zweiten Förderphase wurden die Daten aus der zweiten Versuchsreihe weitergehend analysiert und zudem ein Regelungskonzept unter Einbezug des Drosselventils entworfen und in der angepassten, dynamischen Simulation erprobt.

### 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

In heutigen Luftzerlegungsanlagen verdichten die Haupt- und Boosterkompressoren einen stationär ausgelegten, festen Massenstrom an Umgebungsluft auf ein vorgegebenes Druckniveau. Über verstellbare Eintrittsleitgitter kann prinzipiell die Menge an Luft bei geringem Einfluss auf die Förderhöhe, d.h. den erzielten Druck, reguliert werden. Nachleitgitter im Diffusor sorgen für eine effiziente Umwandlung von dynamischen in statischen Druck, sind heute jedoch noch für einen einzelnen optimalen Betriebspunkt ausgelegt und fest verbaut. Neue Möglichkeiten ergeben sich sowohl mit variablen Nachleitgittern als auch mit verbesserten variablen Eintrittsleitgittern, die für einen flexiblen und effizienten Betrieb einer Luftzerlegungsanlage eingesetzt werden können.

Die Beeinflussung des stationären Verdichterbetriebs durch kombinierte Variationen von Eintrittsleitgitter (*inlet guide vanes*) und Nachleitgitter (*diffusor vanes*) wurde bereits in [1]



untersucht und festgestellt, dass diese Stellorgane aufgrund maschineninterner Querkopplungen gut aufeinander abgestimmt werden sollten. Regelungstechnische Ansätze für den automatisierten Betrieb eines solchen Verdichters sind nicht bekannt. Neben der sinnvollen Einstellung einer erhöhten Anzahl von Stellgliedern erschwert sich die in diesem Umfeld auftretende Regelungsaufgabe zusätzlich durch die hintereinandergeschaltete Anordnung mehrerer Kompressorstufen zu einem Gesamtverdichter mit zwischengeschalteten Kühlereinheiten.

Um unvermeidbaren Anlagenveränderungen, beispielsweise durch Verschmutzungen, aber auch Modellungenauigkeiten zu begegnen, wurde in der ersten Förderphase ein adaptives, in Teilen modellfreies Regelungskonzept entwickelt: Abhängig vom aktuellen Betriebszustand gewährleistet ein Integralregler den zu liefernden Massenstrom über eine geeignete Stellung von Eintritts- und Nachleitgitter. Parallel dazu gibt ein sog. Extremwertregler ein additives Nachleitgitterkommando mit dem Ziel, den Energiebedarf der Anlage zu minimieren. Extremwertregelung ist ein altbekanntes Verfahren für die Echtzeitoptimierung von Prozessen [2]. Der klassische Extremwertregler kommt ohne ein mathematisches Prozessmodell aus. Für gewöhnlich sind diese Verfahren eher träge, weshalb in der Vergangenheit bereits Modifikationen wie die EKF-basierte Extremwertregelung vorgeschlagen wurden [3]. Im Hinblick auf die erwarteten, schnellen Lastwechsel hochflexibler Anlagen, wurde in der ersten Förderphase eine sogenannte Quasi-Newton Extremwertregelung entwickelt, die das Potenzial hat, noch dynamischer zu agieren [4], bisher aber lediglich in der Simulation getestet wurde.

Neben der Regelung ist die Überwachung des dynamischen Prozessgeschehens ein weiterer Aspekt des vorliegenden Arbeitspakets. Hierfür können modellgestützte Messverfahren dienlich sein, die dem transienten Verhalten durch ein integriertes, dynamisches Modell explizit Rechnung tragen. Auf Grund der Beschaffenheit des hier anzuwendenden Prozessmodells und der Erfahrungswerte am Fachgebiet wird für diese Aufgabe die Verwendung eines sog. *Unscented Kalman Filter*, s. [5], mit einer Erweiterung aus [6] vorgeschlagen. Relevante Vorarbeiten bezüglich der angestrebten Überwachung der Kennfelder und Betriebsgrenzen der einzelnen Verdichterstufen finden sich für einfachere Anwendungsfelder (weniger Abhängigkeiten als beim flexiblen Verdichter) in [7] und [8].

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeit fand in Kooperation mit MAN Energy Solutions statt. Die Experimente am einstufigen Prototypen wurden in der Verantwortung von MAN und unter Beteiligung des Fachgebiets im firmeneigenen Prüfstand am Standort Berlin-Tegel durchgeführt. Neben dem generellen Prüfstandsaufbau hat MAN für entsprechende Schnittstellen gesorgt und damit die Einbettung der Fachgebiets-eigenen Hardware in das Prozessleitsystem zur Ansteuerung der Eintritts- und Nachleitgitter geschaffen. Der Industriepartner lieferte zudem die benötigten Mess- und Betriebsdaten zum Aufbau der dynamischen Prozessmodelle.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] H. Simon, T. Wallmann und T. Mönk, „Improvements in Performance Characteristics of Single-Stage and Multistage Centrifugal Compressors by Simultaneous Adjustments of Inlet Guide Vanes and Diffusor Vanes,“ *Journal of Turbomachinery*, Bd. 109, pp. 41-47, 1987.
- [2] Y. Tan, W. H. Moase, C. Manzie, D. Nešić und I. M. Mareels, „Extremum seeking from 1922 to 2010,“ *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, 2010.
- [3] G. Gelbert, J. P. Moeck, C. O. Paschereit und R. King, „Advanced algorithms for gradient estimation in one- and two-parameter extremum seeking controllers,“ *Journal of Process Control*, Bd. 22, Nr. 4, pp. 700-709, 2012.
- [4] A. Lange und R. King, „Discrete-Step, Quasi-Newton Extremum Seeking Control for Multivariable Real-Time Optimization,“ *IFAC-PapersOnLine*, Bd. 53, Nr. 2, pp. 1608-1613, 2020.
- [5] S. Julier und J. Uhlmann, „Unscented filtering and nonlinear estimation,“ *Proceedings of the IEEE*, Bd. 92, Nr. 3, pp. 401-422, 2004.
- [6] S. Kolås und B. Foss, „Constrained nonlinear state estimation based on the UKF approach,“ *Comput. Chem. Eng.*, Bd. 33, pp. 1386-1401, 2009.
- [7] M. Gentsch und R. King, „Real-time estimation of a multi-stage centrifugal compressor performance map considering real-gas processes and flexible operation,“ *Journal of Process Control*, Bd. 85, pp. 227-243, 2020.
- [8] M. Gentsch und R. King, „Real-time estimation of parameter maps,“ *IFAC-PapersOnLine*, Bd. 53, Nr. 2, p. 2391–2396, 2020.



# SynErgie

*Synchronisierte und energieadaptive  
Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung  
von Industrieprozessen auf eine fluktuierende  
Energieversorgung*

Schlussbericht Teilvorhaben:  
D0-2\_TU Berlin (03SFK3D0-2)

01.11.2019 – 30.06.2023

- Öffentlicher Teil -

Datum: 20.12.2023

**KOPERNIKUS**  
SynErgie **PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Teil II: Eingehende Darstellung.....	2
1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	2
1.1 Cluster I: Schlüsselproduktionsprozesse / TP I.6: FlexASU .....	2
1.1.1 Prozess und Prozessführungskonzept.....	2
1.1.2 Modellierung und Simulation.....	5
1.1.3 Konfigurationsanalyse .....	6
1.1.4 Maßnahme zur Pumpvermeidung I: Prozess-Überwachung .....	6
1.1.5 Maßnahme zur Pumpvermeidung II: Kennfeld-Adaption und Visualisierung der Pumpgrenze.....	8
1.1.6 Maßnahme zur Pumpvermeidung III: Prüfstandsregelung mit Drosselventil .....	10
1.1.7 Experimenteller Aufbau .....	11
1.1.8 Evaluation der Experimente am einstufigen Prototyp.....	13
1.1.9 Modifikation und Erweiterung des Prozessführungskonzepts für mehrstufige, flexible Verdichter.....	16
2 Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen .....	20
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	20
4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	20
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens.....	21
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses.....	21
7 Literaturverzeichnis .....	22



## Teil II: Eingehende Darstellung

### 1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendungen wurden vollständig für die Anstellung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters und projektbezogene Dienstreisen verwendet. Die folgenden Abschnitte präsentieren in verkürzter Form die mit der Zuwendung erzielten, wissenschaftlich-technischen Ergebnisse der im Antrag unter

- › I.6.4.1 Vergleich Kompressor-Konfigurationen
- › I.6.4.2 Strategie zur Pumpvermeidung
- › I.6.4.3 Vorbereitung Echtzeitsystem
- › I.6.4.6 Phase-1-Reglerauslegung für Prototyp erfolgt
- › I.6.4.8 Prozessführungskonzept mehrstufiger Getriebekompressor liegt vor
- › I.6.4.10 Verifizierung des Phase-1-Reglers und Erstellung von Auslegungsrichtlinien
- › I.6.4.11 Regelungskonzept für Drosselventil

notierten Meilensteine des Arbeitspakets

#### I.6.4: Experimentelle Regelung verbesserter einstufiger und simulative Prozessführung mehrstufiger Verdichter

### 1.1 Cluster I: Schlüsselproduktionsprozesse / TP I.6: FlexASU

#### 1.1.1 Prozess und Prozessführungskonzept

In diesem Teilprojekt wird sich der Flexibilisierung von Luftzerlegungsanlagen gewidmet. Das Arbeitspaket I.6.4 betrachtet einen Teilprozess der Luftzerlegung: die Verdichtung der Luft. Hier findet der Haupteintrag der aufzuwendenden, elektrischen Leistung in den Luftzerlegungsprozess statt. Die Wandlung der elektrischen Leistung in ein Druckniveau der angesaugten Umgebungsluft von bis zu 70 bar bei notwendigem Volumenstrom leisten die sog. Haupt- und Booster-Kompressoren. Beim Industriepartner MAN Energy Solutions (MAN ES) werden diese Maschinen u.a. in der in Abb. 1 skizzierten Bauweise als *integrally geared compressors* entwickelt. Bei dieser modularen Bauweise werden die einzelnen Radialverdichterstufen über teils lange Rohrleitungen mit externen Wärmeübertragern und nachfolgenden Radialverdichterstufen verbunden. Die genaue Ausführung eines solchen, mehrstufigen Verdichters hängt dabei wesentlich von den Anforderungen des Luftzerlegungsprozesses ab. Bei dem in *FlexASU* betrachteten Anwendungsspektrum werden Synchronmaschinen im Antriebsstrang eingesetzt, so dass die Drehzahl der Rotorwelle des Verdichters fest an die Netzfrequenz des Stromnetzes gekoppelt ist und für eine Regelung des Verdichters nicht zur Verfügung steht [1]. Als alternatives Regelorgan mit hoher Sensitivität zum Mengendurchsatz

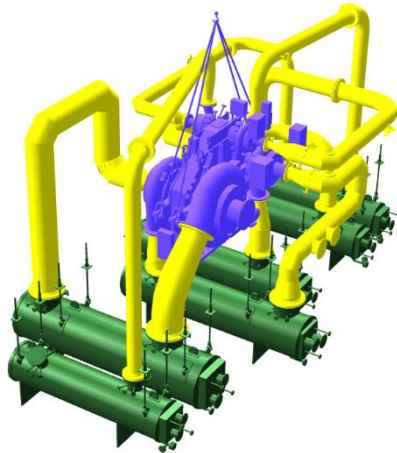


Abb. 1: modularer Aufbau eines integrally geared compressors als CAD-Modell mit Antriebsrad und Radialverdichterstufen (lila), Rohrleitungen (gelb) und Wärmeübertragern (grün) [Quelle: MAN ES]

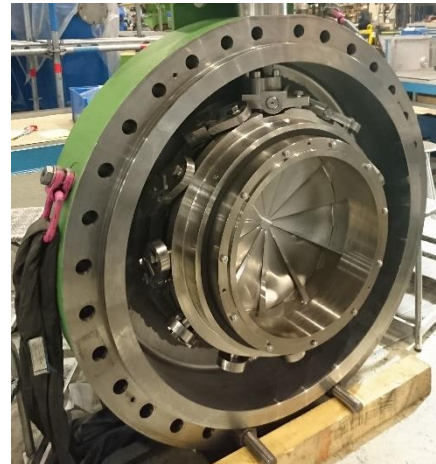


Abb. 2: Foto eines demontierten verstellbaren Eintrittsleitgitters in geschlossenem Zustand [Quelle: MAN ES]

sind verstellbare Eintrittsleitgitter (kurz: IGV, *Inlet Guide Vanes*) saugseitig einzelner Radialverdichterstufen verbaut. Abb. 2 zeigt ein demontiertes Eintrittsleitgitter.

Das Prozessführungskonzept übersetzt die Anforderungen an Flexibilität und Effizienz für den isolierten Teilprozess der Verdichtung wie folgt:

Der vom Verdichter geförderte Massenstrom ist als Regelgröße spezifiziert. Die Förderung des Massenstroms soll dabei – auch im Teillastbereich – unter minimalem Einsatz von elektrischer Leistung, welche für den Antrieb des Verdichters aufzubringen ist, erfolgen. Die Zielgröße, das Leistungsminimum, variiert erwartungsgemäß über den Betriebsbereich und ist vorab unbekannt bzw. nicht exakt prädzierbar. Für diese Problemstellung wird ein sog. Extremwertregler eingesetzt. Dieser führt im laufenden Betrieb auf der Grundlage von Messinformationen eine Optimierung durch. Hierfür muss dem Regler eine weitere Stellgröße mit hoher Sensitivität zur elektrischen Leistung zur Verfügung stehen. An dieser Stelle kommen die vom Industriepartner in SynErgie entwickelten, verstellbaren Nachleitgitter (kurz: DGV, *Diffusor Guide Vanes*) zum Einsatz. Bei diesen neuen Regelorganen handelt es sich um Schaufeln, welche im Diffusor der Verdichterstufe montiert sind. Über Stellmotoren, s. Abb. 4 links, kann der Schaufelwinkel im

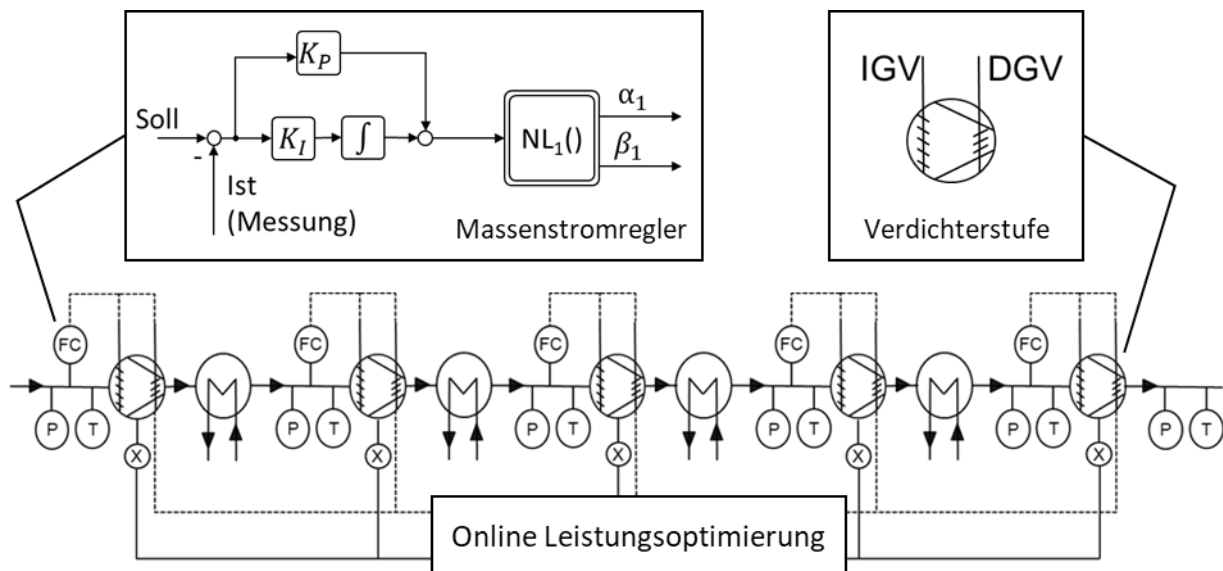


Abb. 3: Prozessführungs-konzept für einen fünfstufigen, flexiblen Verdichter mit stufenseparierter Massenstromregelung

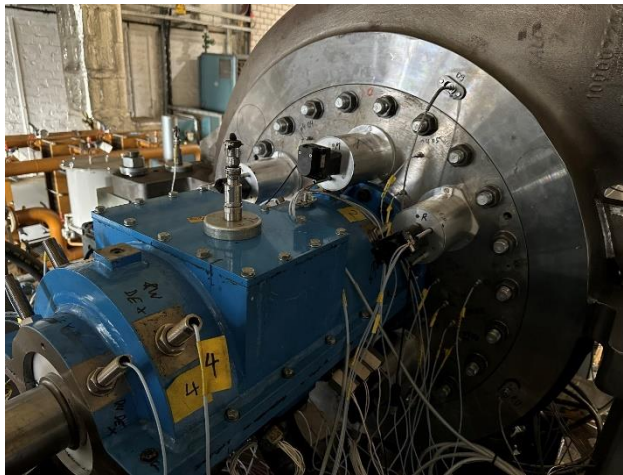


Abb. 4: Fotos zum Nachleitgitter [Quelle: MAN ES];  
 links: Hinterseite der Radialverdichterstufe mit montierten Stellmotoren,  
 rechts: demontiertes Nachleitgitter

Betrieb verstellt werden. Die genaue Ausgestaltung der Prozessführung richtet sich nach der jeweiligen Instrumentierung des individuellen Verdichters. Das Prozessführungs-konzept wie es sich für den idealen Fall eines bestmöglich instrumentierten, fünfstufigen und zwischengekühlten Verdichters darstellt, zeigt Abb. 3. Bei dieser Maschine ist jede Verdichterstufe mit einem Ein- und Austrittsleitgitter, einem eingangsseitigen Massenstrommessgeber sowie einem direkten Leistungsmessgeber instrumentiert.

Die Massenstromregelung setzt sich (in jeder Konfiguration) aus einem klassischen PI-Regler<sup>1</sup> und einer nichtlinearen Kompensation (kurz: NL) zusammen, vgl. Abb. 3. Die NL ist jeweils die Umkehrabbildung der nominell-optimalen Stellwinkel auf den Massenstrom. Aus diesen Stellwinkeln<sup>2</sup> resultiert im nominellen Fall (keine Störungen) die maximale Effizienz des Verdichters.

Der zweite Baustein im Prozessführungskonzept nach Abb. 3, die *Online Leistungsoptimierung*, ist notwendig, um das Leistungsminimum bei vorhandenen Störungen, abweichenden Arbeitspunkten und/oder Modellungenauigkeiten zu erreichen. In der ersten Förderphase wurde für diesen Baustein ein neues Konzept eines Extremwertreglers entworfen und in-silico für die hiesige Anwendung evaluiert und erfolgreich verifiziert: die *Quasi-Newton-Extremum-Seeking-Control* (kurz: QNESC), s. [2].

### 1.1.2 Modellierung und Simulation

Im vorliegenden Arbeitspaket werden Prozessmodelle, dies sind mathematische Abbildungen des betrachteten Verdichtungsprozesses, für verschiedene Aufgaben benötigt:

1. Konfigurationsanalyse
2. Auslegung des Prototypen-Reglers
3. Demonstration der Prozessführung für mehrstufige, flexible Verdichter
4. Einsatz modellbasierter Überwachungsmethoden

In der ersten Förderphase wurden Simulationsmodelle von Verdichterstufen, Wärmeübertragern und Rohrleitungen aus thermodynamischen Prinzipien für ideale Gase abgeleitet und als Bibliothek in der Programmierumgebung *Matlab/Simulink* implementiert. Ein erster Prototyp einer flexiblen Verdichterstufe wurde erst in der zweiten Phase im hauseigenen Versuchsfeld von MAN ES in Berlin realisiert und experimentell untersucht. Die neu gewonnenen Erfahrungen sowie die in Phase II neu erarbeiteten Überwachungsroutinen führten zu umfangreichen Modellanpassungen:

1. Drosselung des Prototypen: In den Simulationsstudien der ersten Phase gab es keine Notwendigkeit, Ventile zu berücksichtigen. Das Modell der Versuchsanlage kommt allerdings ohne ein solches nicht aus. Deshalb wurde ein Ventilmodell neu implementiert und in das Prozessmodell integriert.
2. Wärmekapazitäten: In den Experimenten, die erstmalig in der zweiten Phase durchgeführt wurden, machte sich eine dominante Prozessdynamik bemerkbar, welche vom Aufheizen bzw. Abkühlen der massiven Rohrwand- und Gehäusemassen bestimmt wird. Die Modelle wurden zur Abbildung dieses Phänomens erweitert.
3. Stufenaustrittstemperatur: Für den Wechsel von einer direkten Leistungsmessung hin zu einer auf den Stufenaustrittstemperaturen basierender Ersatzmessung, s. unten, muss eine äquivalente Schnittstelle in die Modelle integriert werden. Das in Punkt (2)

<sup>1</sup> Für die (Re-)Initialisierung des Integratorzustands (bei Eintreten bestimmter Events) wird ein spezielles Konzept angewandt, das einen weichen Übergang zwischen verschiedenen Betriebsphasen beabsichtigt.

<sup>2</sup> IGV und/oder DGV, je nach Konfiguration



beschriebene Phänomen beeinflusst diese Temperaturmessungen stark. In den Modellen werden geeignete Korrelationen abgebildet.

4. Stufenkennfelder als multivariate, stückweise lineare Interpolante: Für eine geeignete Darstellung der Stufenkennfelder in den Modellen wurde viel Entwicklungsarbeit investiert. Im Ergebnis steht eine spezielle Skalarprodukt-Darstellung einer beliebig hochdimensionalen (multivariaten),  $C^0$ -stetigen Interpolante, die die unten beschriebenen, modellbasierten Echtzeitanwendungen ermöglicht und flexibel an die Verdichterkonfiguration angepasst werden kann.
5. Messgeber: Im industriellen Umfeld am Prototypen-Prüfstand treten Verzögerungen und hochfrequente Störanteile in der Messkette auf. Das Prozessführungskonzept muss robust gegen diese Effekte sein. Für belastbare Simulationsstudien wurden diese Effekte in das Modell integriert.

### 1.1.3 Konfigurationsanalyse

In den bisherigen Untersuchungen der ersten Phase wurde davon ausgegangen, dass in jeder Kompressorstufe ein verstellbares IGV und DGV zur Verfügung steht. Hier wird untersucht, ob auf einzelne Regelorgane verzichtet werden kann und wie deren Einfluss auf Flexibilität und Effizienz zu bewerten sind. Konkret steht lediglich der Verzicht verstellbarer IGV in allen Stufen bzw. in den hinteren Stufen zur Diskussion; die verstellbaren DGV stellen die wesentliche, unverzichtbare Innovation der neuartigen flexiblen Verdichter dar.

Die Untersuchung basiert auf einem Simulator einer fiktiven, 5-stufigen und zwischengekühlten Verdichter-Einheit einer Luftzerlegungsanlage. Für jede Konfiguration werden neue Verdichter-Kennfelder mit einem Auslegungsprogramm entworfen. Das Auslegungsprogramm stammt von MAN ES; es berücksichtigt die erwarteten Abhängigkeiten zu verschiedenen IGV- und DGV-Stellungen. Auf dieser Basis lassen sich qualitative Aussagen ableiten. Vom Arbeitsbereich eines fünfstufigen Verdichters ohne IGV-Instrumentierung ausgehend, erhöht sich die erreichbare Betriebsfläche um ca. 24% durch Instrumentierung eines verstellbaren IGV saugseitig der ersten Stufe. Der Zugewinn an Betriebsfläche durch Instrumentierung weiterer vier IGV saugseitig der nachfolgenden Stufen ist mit ca. 46% knapp doppelt so groß.

Neben der Flexibilisierung hat die IGV-Instrumentierung ebenso einen Effekt auf die Effizienz des Verdichters. Es stellt sich deutlich heraus, dass der Verzicht einer IGV-Instrumentierung mit höheren (aufzubringenden) Leistungen vor allem im Teillastbereich hin zu niedrigen Massenströmen bezahlt wird. In der Nähe des Auslegungspunkts (hoher Austrittsdruck, hoher Massenstrom) verschwinden die Leistungsunterschiede nahezu. Konkret beziffern die Modelle den Mehraufwand im Verhältnis zur vollständig instrumentierten Konfiguration mit 0,1 – 27% bzw. 0,2 – 34,6% für eine Konfiguration mit nur einem IGV bzw. für eine Konfiguration ohne IGV über den gesamten Arbeitsbereich.

### 1.1.4 Maßnahme zur Pumpvermeidung I: Prozess-Überwachung

Die Flexibilisierung des Verdichters, insbesondere die erhöhte Frequenz transienter Betriebsphasen, bedingt einen Systemwechsel hinsichtlich der Prozessüberwachung. Diese neue Situation zusammen mit der konventionellen Überwachung verzögerter Messdaten verkürzt

Schlussbericht D0-2\_TU Berlin (03SFK3D0-2)6

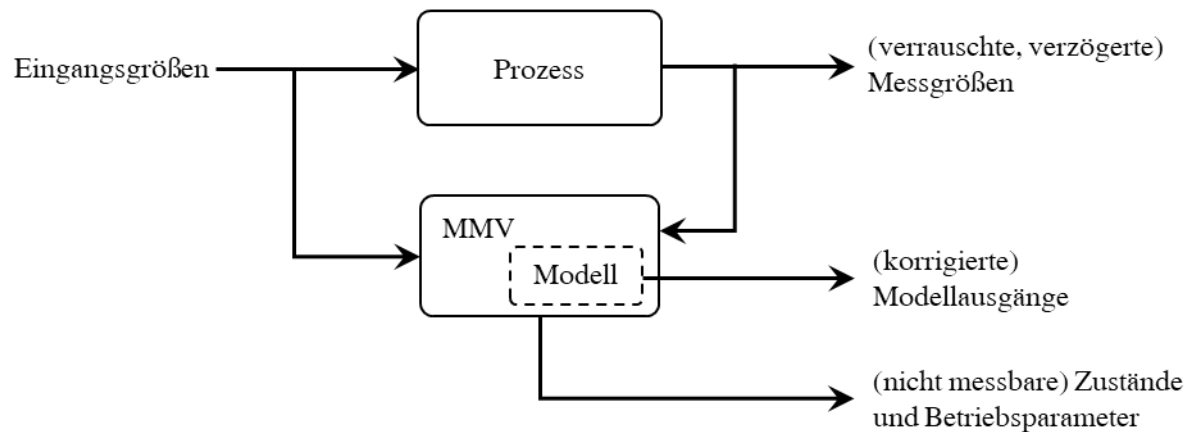


Abb. 5: Prinzip eines modellgestützten Messverfahrens (MMV)

die Zeitmargen, die den Anlagenfahrer:innen zur Abwendung kritischer Betriebszustände verbleiben. Bezüglich des Verdichters geht es dabei um die Vermeidung des schädlichen Pumpbetriebs. Neben der Verzögerung sind die Messdaten zudem mit hochfrequenten Störanteilen überlagert. Bei zu schlechten Signal-Rausch-Verhältnissen werden diese Störungen mit einem klassischen Tiefpassfilter unterdrückt und das gefilterte, geglättete Signal auf dem Überwachungsmonitor angezeigt. Solche Maßnahmen verstärken die Verzögerungen in der Messkette (bis zum Überwachungsmonitor) jedoch.

Um der Problemstellung gerecht zu werden, werden in diesem Arbeitspaket modellbasierte Überwachungskonzepte eingesetzt, die dem dynamischen Systemverhalten explizit Rechnung tragen. Die (weiter)entwickelten Modelle dienen fortan nicht nur zu Demonstrations- und Auslegungszwecken; ferner sollen die Modelle in ein modellgestütztes Messverfahren (MMV) integriert werden. Das grundlegende Konzept dieser Verfahren zeigt Abb. 5. Das MMV korrigiert die Modellzustände und ausgewählte Parameter in Echtzeit auf Grundlage der aktuellen Messgrößen. Damit lässt sich ein dynamisches und (bei richtiger Einstellung des MMV) gefiltertes Pendant zu den Messgrößen, die Modellausgänge, berechnen. Neben dieser Messdatenkorrektur stehen durch die Modellintegration alle weiteren, nicht messbaren Modellzustände und Betriebsparameter für die Überwachung zur Verfügung. So kann z.B. eine im Modell berechnete Sicherheitsmarge zur Pumpgrenze in Echtzeit ausgegeben werden, s. unten.

Auf Grund der Modellbeschaffenheit und der Erfahrungswerte der Autoren, s. z.B. [3], wird als MMV ein sog. *Unscented Kalman Filter* (UKF, s. [4]) mit einer Erweiterung aus [5] implementiert. Diese Erweiterung trägt (physikalischen) Beschränkungen des Systemzustands Rechnung. Durch den verwendeten Ansatz werden die im Arbeitspaket formulierten Anforderungen übererfüllt. Neben der geforderten Berücksichtigung diverser, stufenindividueller Abhängigkeiten der Pumpgrenze können Unsicherheiten durch Messung und Modellierung quantifiziert werden; zudem stehen mit dem MMV viele weitere nicht messbare Betriebsparameter für Überwachungszwecke oder für eine Weiterverarbeitung in übergeordneten Routinen zur Verfügung.

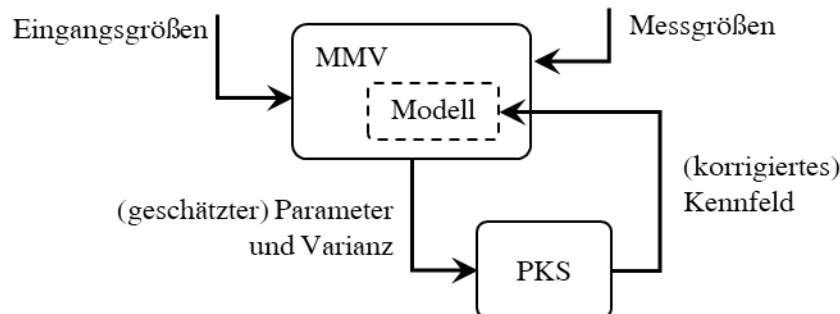


Abb. 6: Prinzip der Parameterkartenschätzung (PKS) im dualen Konzept mit einem modellgestützten Messverfahren (MMV)

### 1.1.5 Maßnahme zur Pumpvermeidung II: Kennfeld-Adaption und Visualisierung der Pumpgrenze

Bei diesen umfangreichen Arbeiten geht es um die relevante Problemstellung, dass das Verdichterkennfeld und die Pumpgrenze nicht genau bekannt sind oder mit der Zeit variieren, beispielsweise durch die unvermeidbare Verschmutzung eines vorgeschalteten Luftfilters in der industriellen Realisierung. Beim flexiblen Verdichter kommt durch die neuen Regelorgane, das verstellbare DGV, eine zusätzliche Kennfelddimension hinzu, über die zu Beginn der zweiten Förderphase kaum Erfahrungswerte vorliegen. In diesem Arbeitspaket wurde ein Verfahren entwickelt, das sich den beschriebenen Problemstellungen widmet: die Parameterkartenschätzung (PKS) adaptiert die Kennfelder während des laufenden Betriebs. Die Adaption wird anhand von Parameterschätzungen vorgenommen und in einem optimalen Sinne (minimale Summe der erwarteten Fehlerquadrate) unter Berücksichtigung der Unsicherheit dieser Schätzung ausgeführt. Ausgangslage der Entwicklung war ein frühes Stadium der PKS, das in [6] für univariate Kennlinien (eine unabhängige Variable) und in [3] für bivariate Kennfelder (zwei unabhängige Variablen) präsentiert ist. Die signifikante Weiterentwicklung der Methode beinhaltet ihre Erweiterung auf multivariate Zusammenhänge (beliebig viele unabhängige Variablen) und die Ausarbeitung eines Automatismus, der eine optimale, betriebspunktabhängige Wahl vormals freier Designparameter leistet, wodurch in der Konsequenz auch die Schätzgüte verbessert wird.

Im multivariaten Fall ist das Kennfeld der PKS eine Hyperebene, die sich über das rechtwinklige Knotengitter der unabhängigen Variablen aufspannt. Diese Hyperebene weist durch den gewählten Ansatz eine endliche Menge stückweise konstanter Differenzenquotienten auf, die das Pendant zu Steigungen, Krümmungen, etc. (im Allgemeinen Ableitungen) von stetig differenzierbaren Hyperebenen darstellen. Die vollständige Menge dieser Differenzenquotienten lässt sich dank der entwickelten Kennfelddarstellung als Matrix-Vektor-Produkt darstellen, wodurch sehr schnell (in einer Echtzeitroutine) Bereiche gleicher Steigungen ermittelt werden können. Eine Pump- bzw. Sicherheitsgrenze lässt sich auf Basis solcher Steigungen definieren, die dann auf eine zweidimensionale Projektion des (hochdimensionalen) Kennfelds übertragen und visualisiert werden können.

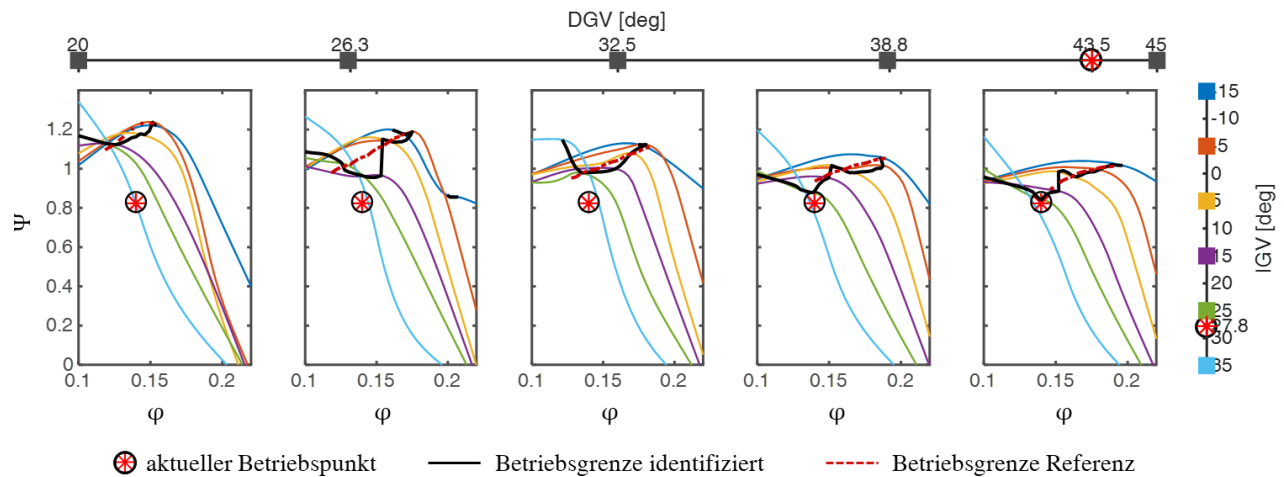


Abb. 7: beispielhafter Monitor zur Überwachung des adaptiven Kennfelds einer (fiktiven) Verdichterstufe nach einstündigem Betrieb; Erläuterungen im Text

Abb. 7 zeigt einen möglichen Überwachungsmonitor, auf dem das adaptierte Kennfeld einer Verdichterstufe – projiziert auf die aktuelle Stufenmachzahl – samt Betriebsgrenzen visualisiert wird. Die farbigen Isolinien zeigen stationäre Betriebspunkte gleicher IGV-Stellung in der  $\Psi$ - $\phi$ -Ebene an.<sup>3</sup> Die Variation dieser Kurven bei Verstellung des DGV ist durch die fünf Projektionen auf die hervorgehobenen DGV-Knotenpunkte dargestellt. In diesen Knotenprojektionen variiert auch die Betriebsgrenze sichtlich. In der beispielhaft veranschaulichten Situation befindet sich der aktuelle Betriebspunkt bei der hohen DGV-Stellung sehr nah an der Betriebsgrenze, während die Sicherheitsmarge mit kleineren DGV-Stellungen steigt. Die dargestellte Situation stammt aus einer Demonstrationsstudie zur Kennfeldidentifikation. Hierbei sollte absichtlich kein Vorwissen über die Kennfeldgestalt eingebracht werden; entsprechend wurden alle IGV-Isolinien mit konstanter Druckzahl  $\Psi = 0,4$  initialisiert, was einer physikalisch unsinnigen Kennfeldform gleichkommt. Abb. 7 zeigt die Kennfeldadaption nach Simulation eines einstündigen Betriebs. Die zugehörigen IGV-Kurven nehmen bereits eine physikalisch sinnvolle Gestalt an. Die schwarz durchgezogene Betriebsgrenze wurde rein nach obigem Schema anhand der entsprechenden Gradienten und entsprechend ohne jegliches Vorwissen ermittelt. Mit Vorwissen oder längerem Einsatz der Echtzeitmethode kann diese Schätzung wesentlich verbessert werden. Die (in der Simulationsstudie exakt bekannte) korrekte Betriebsgrenze ist als rot gestrichelte Linie als Referenz eingezeichnet. Jenseits der Betriebsgrenze (hin zu kleineren Volumenstromzahlen  $\phi$ ) haben die dargestellten Kurven keine praktische Relevanz und könnten in der Visualisierung ausgespart werden.

<sup>3</sup>  $\Psi$  – Druckzahl       $\phi$  – Volumenstromzahl



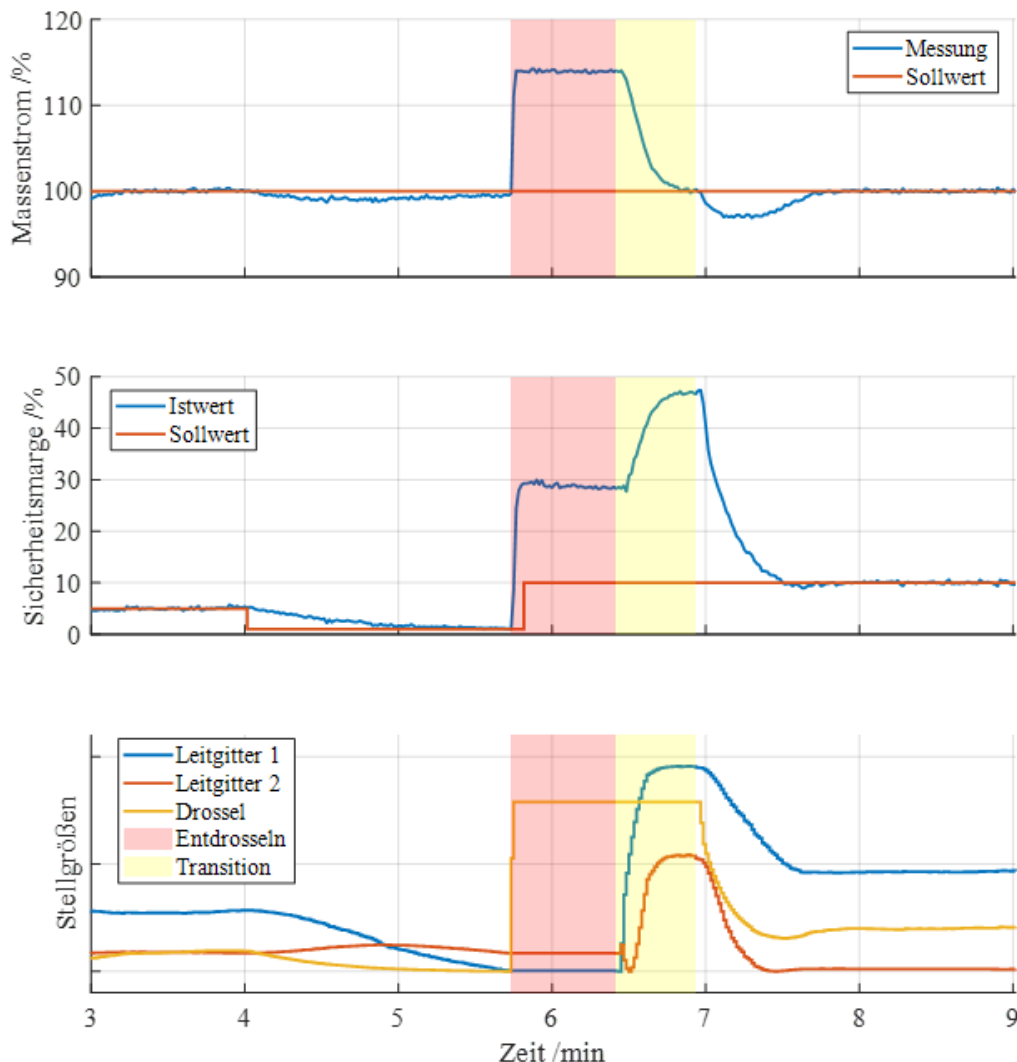


Abb. 8: Prüfstandssimulation mit erweitertem Pumpgrenzregler

### 1.1.6 Maßnahme zur Pumpvermeidung III: Prüfstandsregelung mit Drosselventil

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Maßnahmen und Software-Werkzeuge präsentiert, die eine Überwachung des Betriebszustands inklusive einer Sicherheitsmarge ermöglichen. Die Reaktion auf dieses Informationsangebot obliegt i.d.R. den Anlagenfahrer:innen. In den unten beschriebenen Prüfstandsversuchen wird in einer solchen Situation aus der Leitwarte heraus das Drosselventil stromab der Verdichterstufe weiter geöffnet. Im Nachgang der Experimente wurde in dynamischen Simulationen mit dem dann an die Versuche angepassten Modell untersucht, inwieweit die Automatisierung des Drosselventils, d.h. die Freigabe der Ventilstellung an einen gesonderten Pumpgrenzregler (kurz: *ASC*, *Anti Surge Controller*), erfolgen kann. Ein konventioneller ASC – wie er bisher in Automatisierungskonzepten von Verdichtern zum Einsatz

kommt – konterkariert die erreichten Vorteile der Flexibilisierung durch eine statisch implementierte Pumpgrenze. Auf der Grundlage der Vorarbeiten aus den vorangegangenen Abschnitten wird simulativ ein speziell auf die Prüfstandssituation angepasster ASC untersucht. Das gewählte Schema beabsichtigt einen Kompromiss aus schnellem Folgeverhalten, geringer Störung des separaten Massenstromregelkreises und insbesondere die Vermeidung bzw. starke Reduktion eines Überschwingens der Sicherheitsmarge aus der kritischen Richtung. In der Prüfstandssimulation, s. Abb. 8, zeigt der implementierte ASC das gewünschte Verhalten. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass mit dieser Maßnahme die Prozesssicherheit erhöht werden kann und so bei der Umsetzung und zukünftigen Entwicklung des flexiblen Verdichters im Prüffeld dienlich sein kann.

### 1.1.7 Experimenteller Aufbau

Im Rahmen der zweiten Förderphase wird das erarbeitete Prozessführungskonzept mit den neuartigen Regelorganen (DGV) erstmalig experimentell untersucht. Die Experimente finden bei MAN ES in einem hauseigenen Prüfstand statt. In diesem Prüfstand wird ein einstufiger, mit verstellbaren Leitgittern ausgestatteter, radialer Luftverdichter (kurz: Prototyp) betrieben. Wie der Hauptkompressor einer Luftzerlegungsanlage saugt der Prototyp Umgebungsluft an. Auf der Druckseite des Verdichters findet die Massenstrommessung mittels Messblende nach ausreichend langer Vorlaufstrecke zur Strömungsberuhigung statt. Stromab der Blendenmessung befindet sich das Drosselventil gegen dessen Strömungswiderstand der Druckaufbau stattfindet.

In diesem Arbeitspaket liegt der Fokus auf der Entwicklung der Regelungssoftware für das erarbeitete Prozessführungskonzept. Dieser Entwicklungsprozess orientiert sich am sog. *Rapid Control Prototyping*. Dies erlaubt die Entwicklung und Testung komplexerer Regelalgorithmen in einer komfortablen Simulationsumgebung (hier: *Matlab/Simulink*) auf einem sog. *Host-PC*. Nach erfolgreichem Abschluss wird der Regelalgorithmus aus der Simulationsumgebung mittels automatischer Codegenerierung in ein maschinennahes Programm übersetzt und auf einen Echtzeitrechner (hier: *Speedgoat Performance Target Machine*) übertragen. Die Kopplung an den Prozess erfolgt über geeignete Schnittstellen. Eine nach der Prozesskopplung verbleibende, optionale Verbindung zum Host-PC ermöglicht es, komfortabel und schnell in den Algorithmus einzugreifen, Anpassungen vorzunehmen bzw. auf alternative, vorbereitete Algorithmen zu wechseln. Der Echtzeitrechner und die Schnittstelle müssen entsprechend vorbereitet werden. Die wesentlichen Spezifikationen der verwendeten Hardware sind in Tabelle 1 aufgelistet:

<b>Modell</b>	performance real-time target machine
<b>CPU</b>	Intel® Core™ i7-7700K @ 4,2 GHz
<b>Random Access Memory</b>	32 GB
<b>Messkarte</b>	FPGA configurable I/O Module,
<b>Schnittstellen</b>	16 analoge Eingangskanäle $\pm 10$ V, 8 analoge Ausgangskanäle $\pm 10$ V, 16-bit 500 kHz A/D-Wandler je Kanal

*Tabelle 1: Spezifikationen des verwendeten Echtzeitrechners der Firma Speedgoat*

Da mit dem Echtzeitrechner nicht nur Signale empfangen, sondern auch in den Prozess (zur Ansteuerung von IGV und DGV) zurückgesendet werden, sind – auch im Hinblick darauf, dass es sich hier um erstmalige Versuche eines neuen Regelkonzepts handelt – sicherheitstechnische Vorgaben beim Aufbau der Mess- und Steuerkette zu berücksichtigen. Es wurde daher entschieden, den Echtzeitrechner nicht direkt an den Prozess zu koppeln und stattdessen den Prozessleitrechner zwischenzuschalten. Eine schlechtere Signalqualität, insbesondere durch die (ungeschützte) Klemmleiste im Störbereich des Frequenzumrichters, sowie eine nicht ausschließbare Zwischenverarbeitung der Signale durch den Prozessleitrechner werden in diesem Setup in Kauf genommen. Folgende Kanäle wurden zwischen Prozessleitrechner und Echtzeitrechner eingerichtet:

<b>Eingang (Echtzeitrechner)</b>		<b>Ausgang (Echtzeitrechner)</b>	
Saugdruck	$p_0$	IGV Stellung kommandiert	$\alpha_{soll}$
Saugtemperatur	$T_0$	DGV Stellung kommandiert	$\beta_{soll}$
Austrittsdruck	$p_1$		
Austrittstemperatur	$T_1$		
Elektrische Leistung	$P_{el}$		
Drehzahl gemessen	$n$		
IGV Stellung gemessen	$\alpha_{ist}$		
DGV Stellung gemessen	$\beta_{ist}$		
Massenstrom	$\dot{m}$		
Umgebungstemperatur	$T_{(\infty)}$		
Umgebungsdruck	$p_{(\infty)}$		

*Tabelle 2: Ein-/Ausgangskanäle während der Prüfstandsversuche*

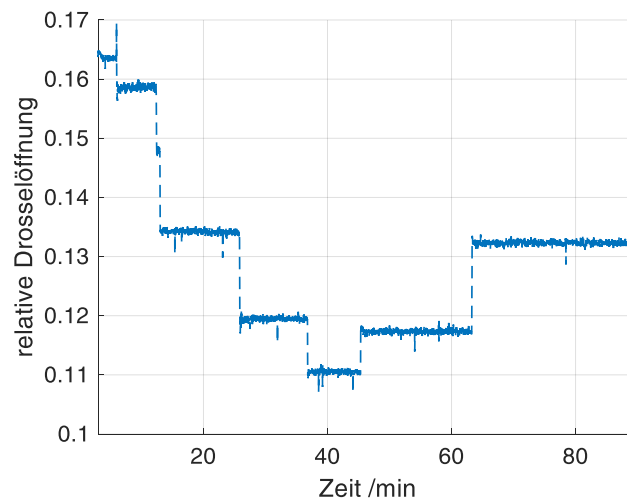


Abb. 9: relative Drosselöffnung gemäß Prozessüberwachung (MMV)

### 1.1.8 Evaluation der Experimente am einstufigen Prototyp

Die regelungstechnischen Experimente am einstufigen Prototypen konnten erst am Ende der regulären Projektlaufzeit der zweiten Förderphase, mit erheblicher Verzögerung zum ursprünglichen Zeitplan stattfinden. Entsprechend haben alle Entwicklungen dieses Arbeitspakets die meiste Zeit dieser Projektphase auf bestimmten Annahmen gefußt. In den Experimenten stellten sich dann einige dieser Annahmen als unzutreffend heraus:

1. Der Aufheiz- und Abkühlvorgang der umhüllenden Wandmassen ist sehr dominant. Der Prozess ist damit insgesamt um Größenordnungen träger als bisher angenommen.
2. Die Drosselventilstellung wird manuell auf (die meiste Zeit über) konstante Werte eingestellt und nicht zur Regelung (konstanter) Enddrücke eingesetzt.
3. Die Drosselventilstellung wird nicht aufgezeichnet.
4. Das Messrauschen auf den meisten Kanälen ist sehr viel stärker als angenommen.
5. Das Signal auf dem Kanal der elektrischen Leistung ist fehlerhaft und mit einem niederfrequenten Störmuster überlagert.
6. Die Leitgitter haben kein ideales Folgeverhalten. Sie reagieren zeitverzögert und haben Spiel in Relation zum Stellkommando.

Als Reaktion auf diese Erkenntnisse wurden einige Modifikationen und Erweiterungen an der implementierten und für die Experimente vorbereiteten Regelungssoftware noch während der Versuchskampagne vorgenommen. Die Punkte (1) und (2) haben zu den eingangs beschriebenen Modellerweiterungen geführt. Um die Prozessdynamik des Prüfstands mit der vorhandenen Modellstruktur abbilden zu können, muss der über das Drosselventil abgelassene Massenstrom zwingend modelliert werden. Die Stellung (Öffnung) dieses Ventils hat erheblichen Einfluss auf diese Größe und muss für alle modellbasierten Anwendungen bekannt sein. Der Schlussbericht D0-2\_TU Berlin (03SFK3D0-2)13



Umgang mit der in Punkt (3) beschriebenen Situation ist wie folgt: Die Drosselventilstellung wird als freier Modellzustand in dem modellgestützten Messverfahren (MMV), vgl. Abb. 5, betrachtet und über dieses Verfahren in Echtzeit geschätzt. Auf diese Weise ist es möglich, die fehlende Stelltrajektorie aus Messdaten zu rekonstruieren. Abb. 9 zeigt eine beispielhafte Trajektorie der geschätzten Drosselventilstellung. Im Gegensatz zum quantitativen Niveau lassen sich die Zeitpunkte und die Richtung der Verstellung mit der realen Versuchsdurchführung abgleichen. Die Methodik liefert diesbezüglich korrekte Ergebnisse. Das MMV und die erarbeitete Überwachungsmethodik insgesamt erweisen sich hier als probates Mittel, das Fehlen einer relevanten Prozessgröße zu kompensieren.

Um den negativen Effekt des Messrauschens (4), welches in den Experimenten stärker ausgeprägt war als zuvor erwartet, auf die Reglerperformance zu reduzieren, wurden softwareseitig folgende Maßnahmen ergriffen:

- a) Filterung aller Messgrößen aus Tabelle 2 über das MMV
- b) Rückführung der mit dem MMV gefilterten Modellausgänge anstelle der entsprechenden Messgrößen in die Regleroutine
- c) Implementierung eines digitalen Butterworth-Filters für die Gradientenschätzung innerhalb der Extremwertregelung (EWR)
- d) Erhöhung der Amplitude des Perturbationssignals der EWR zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses

Die Extremwertregelung (EWR) leistet die Echtzeit-Minimierung des Energiebedarfs bzw. der elektrischen Leistung der Anlage. Für diese Aufgabe wird ein Messsignal dieser physikalischen Größe benötigt. In der Versuchsplanung wurde hierfür das Leistungssignal des Frequenzumrichters (FU) aus dem Antriebsstrang des Verdichters vorgesehen. Während der Experimente zeigte sich neben dem erwartbaren, hochfrequenten Messrauschen eine niederfrequente Überlagerung auf dem entsprechenden Messkanal, s. Punkt (5). Letztendlich musste die Verwendung dieses Messsignals für die EWR verworfen werden. Statt der elektrischen Leistung wurde fortan die Stufenaustrittstemperatur als alternative Messgröße verwendet. Bis auf betriebspunktabhängige Verluste ist die Austrittstemperatur im stationären Betrieb des einstufigen Prototypen sogar proportional zur elektrischen Leistung. Im transienten Betrieb ist die Temperaturmessung jedoch sehr viel träger als eine mechanische oder elektrische Leistungsmessung. Die applizierte, auf dieser Messgröße beruhende EWR ist um den entsprechenden Faktor langsamer als eine hypothetische EWR, die ein fehlerfreies Leistungssignal verwenden könnte.

Der letzte Punkt (6) der Auflistung oben betrifft das mangelhafte Folgeverhalten der Stellaktuatoren zur Positionierung der Leitgitter, IGV und DGV. Als Ursache wird ein zwischengeschalteter Mechanismus zur Verschleißreduktion der Aktuatoren vermutet. Für den angestrebten, flexiblen Betrieb mit einer integrierten Regelung ist ein solcher Mechanismus jedoch sehr hinderlich, da die Regelung erwartungsgemäß permanent (mit zumeist sehr kleinen Amplituden) Verstellungen an den Leitgittern vornimmt. Aus regelungstechnischer Sicht sollte dieser Umstand für zukünftige Experimente behoben werden, indem Stellaktuatoren zum Einsatz kommen, die speziell für eine dynamische Fahrweise konzipiert sind.

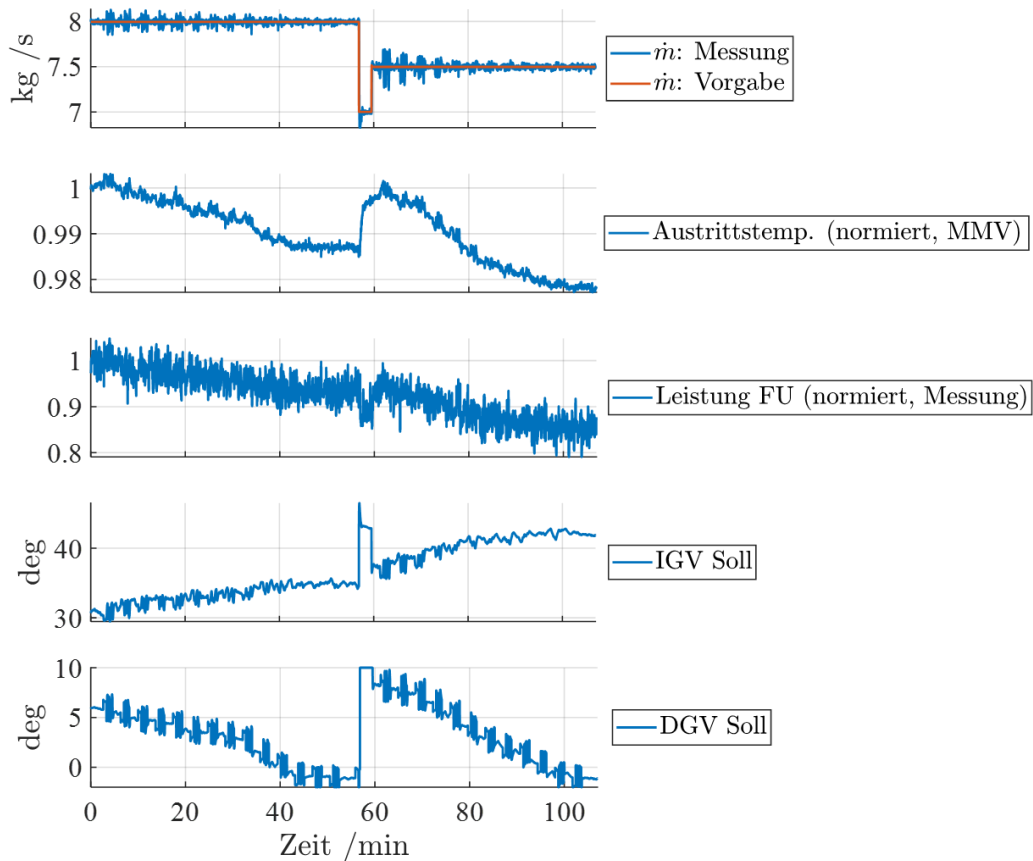


Abb. 10: angepasste Prozessführung im Experiment mit kommandierten Arbeitspunktwechseln nach ca. 57 und 60 Minuten

Abb. 10 zeigt einen repräsentativen Versuchsablauf mit eingeschalteter Massenstrom- und Extremwertregelung. Nach ca. 57 und 60 Minuten wird ein Arbeitspunktwechsel durch eine sprungförmig veränderte Massenstromvorgabe erzwungen. Die Regler sind zu diesem Zeitpunkt für eine schnelle Prozessführung zulasten höherer, temporärer Abweichungen parametrisiert. Die Abweichungen im Massenstromsignal haben ihre Ursache in der im DGV-Signal erkennbaren Perturbation der EWR. Die beobachtete Abnahme (der Massenstromabw.) mit der Annäherung zum Leistungsminimum deckt sich mit der theoretischen Vorhersage, die in der ersten Förderphase getroffen wurde, s. [7]. Die Leistungsabnahme kann anhand des gestörten Leistungssignals aus dem FU tendenziell erahnt werden. Die EWR beruht hier auf der mittels MMV geschätzten Austrittstemperatur; der nahezu monotone Abstieg in jeder Phase (vor 57. und nach 60. Minute) ist in diesem Signal besser zu erkennen. In beiden Phasen stellt sich der leistungsminimale Betrieb für negative DGV-Stellwinkel  $\beta \approx -1^\circ$  ein. Überhaupt lagen die optimalen DGV-Stellwinkel bei allen in den Experimenten erprobten Betriebspunkten in einem Bereich nahe oder unter null und im zulässigen, negativen Stellbereich ist die Sensitivität zur Leistung bzw. Austrittstemperatur deutlich reduziert. Dass der Regler zum Arbeitspunktwechsel

so weit aus dem Optimum springt ( $\beta(t = 60 \text{ min}) \approx 10^\circ$ ), ist vom Stellanteil des Massenstromreglers verschuldet. Die konkrete Ursache liegt in dieser Situation und für diesen Betriebspunkt an einer ungeeigneten Nichtlinearen Kompensation (NL, vgl. Abb. 3). Das Regelungskonzept erweist sich hier als robust und fährt unter Einhaltung des Massenstroms zurück in den leistungsminimalen Betrieb. Bis zum Punkt der maximalen Energieeinsparung von ca. 9% benötigt es jedoch gut 40 Minuten.

Im Gegensatz zum ursprünglichen Prozessführungskonzept, welches auf unzutreffenden Annahmen beruhte, findet das modifizierte Prozessführungskonzept zuverlässig das Leistungsoptimum. Durch die getroffenen Maßnahmen benötigt die Echtzeit-Optimierung jedoch wesentlich mehr Zeit, was insbesondere dem Wechsel von dem Leistungs- auf das Temperatursignal geschuldet ist. Hier kommt der Effekt des zuvor in den Simulationen vernachlässigten Aufheiz- und Abkühlvorgangs der Wandmassen zum Tragen. Die dominante Systemzeitkonstante steigt um das 21-fache von ca. 20 Sekunden auf ca. 7 Minuten. Die passende Neuausrichtung der EWR entspräche einer 21-fachen Reduzierung der Perturbationsfrequenz, was einer 21-fachen Erhöhung der Anregungsdauer im Rahmen der applizierten EWR gleichkäme (QNEsc, s. [2]). In Befürchtung einer erheblichen Streckung der Dauer der ohnehin sehr zeitintensiven Experimente wurde von einer solchen Anpassung abgesehen. Angepasste Simulationen, die im Nachgang der Experimente durchgeführt wurden, weisen jedoch darauf hin, dass längere Anregungsphasen die Zeit zum Erreichen des Optimums insgesamt stark reduzieren können. Dieser Widerspruch wird dadurch aufgelöst, dass längere Anregungsphasen i.d.R. bessere Gradientenschätzungen innerhalb der EWR ermöglichen, wodurch die Konvergenzgeschwindigkeit (bei der QNEsc durch größere Stellkommandosprünge) überproportional (zur Erhöhung der Anregungsdauer) zunimmt.

#### 1.1.9 Modifikation und Erweiterung des Prozessführungskonzepts für mehrstufige, flexible Verdichter

Durch die regelungstechnische Versuchsreihe am einstufigen Prototypen konnten wertvolle Erfahrungen in Bezug auf die zu erwartende Betriebssituation in der industriellen Umgebung gesammelt werden. Einige Annahmen und Spezifikationen mussten in diesem Zuge revidiert werden. Daraus wurden zahlreiche, softwareseitige Modifikationen abgeleitet, die insgesamt zu einer Robustifizierung des ursprünglichen Prozessführungskonzepts beitragen und die Tauglichkeit für eine industrielle Applikation wesentlich erhöhen. Die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Modifikationen und weitere Anpassungen sind auf das Prozessführungskonzept für den mehrstufigen Verdichter zu übertragen. Hierbei wird diesmal die in Abb. 11 dargestellte Verdichterkonfiguration angenommen, bei der nicht nur – wie letztendlich in den Experimenten – auf die direkte Leistungsmessung, sondern auch auf die kostenintensiven IGV-Instrumentierungen und Massenstrommessungen stromab der (ersten) Saugstufe verzichtet wird.

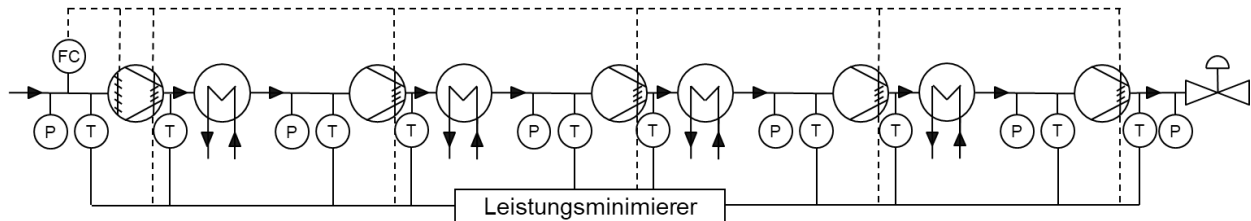


Abb. 11: Angepasstes Prozessführungskonzept für einen fünfstufigen Verdichter mit Zwischenkühlung und reduzierter Instrumentierung

Der Wechsel von einer direkten Messung der elektrischen Leistung auf eine leistungsäquivalente, kalorische Messung hat einen entscheidenden Anwendungsvorteil: Die dafür notwendigen Temperaturmessgeber sind zumeist ohnehin in den Anlagen verbaut, sie sind kostengünstig und in der industriellen Anwendung etabliert. Die Leistung, die ein  $N$ -stufiger Verdichter auf das Prozessmedium (Luft) überträgt, entspricht der Summe der einzelnen Stufenleistungen:

$$P = \sum_{i=1}^N P_i = \sum_{i=1}^N \dot{m}_i \Delta h_i \approx \dot{m}_1 c_p \sum_{i=1}^N \Delta T_i$$

Hierbei wird ein adiabater Verdichtungsprozess zwischen Stufenein- und -austritt angenommen. Für einen stationären Betriebspunkt (ohne Leckagemassenströme, d.h.  $\dot{m}_i = \dot{m}_1, i = 1, \dots, N$ ) und thermisch und kalorisch perfektes Gas (Luft: isobare Wärmekapazität  $c_p \neq c_p(T, p)$ ) ist diese Leistung folglich proportional zur Summe der Temperaturerhöhungen  $\Delta T_i$  über alle Verdichterstufen.

Eine weitere Modifikation, die das dynamische Verhalten der Anlage sichtlich verbessert, ist das rampenförmige Führen der Massenstromvorgabe (Sollgröße) und des Perturbationssignals der EWR, welche als additives Stellkommando auf die DGV-Stellwinkel übertragen wird. In Abb. 12 ist oben das rampenförmig geführte Perturbationssignal und unten die zugehörige Anlagenreaktion in Form der aus den pseudo-verrauschten Messdaten berechneten Gesamtleistung für einen beispielhaften Arbeitspunkt abseits des Leistungsoptimums zu sehen. Für die Gradientenschätzung innerhalb der EWR wird dann ein autoregressives Modell mit exogenem Eingang (ARX-Modell) an die (in diesem Fall simulierten) Messdaten angepasst, s. [2]. Eine Vorfilterung des Mess- und Anregungssignals mit einem Butterworth-Filter 2. Ordnung und einer Eckfrequenz von  $f_c = 4/\tau$ , wobei  $\tau$  der dominanten Systemzeitkonstante von 420 Sekunden entspricht, bringt eine erhebliche Verbesserung der ARX-Schätzung hervor. Dies ist optisch anhand der eingezeichneten ARX-Modellantworten in Abb. 12 unten erkennbar; numerisch wird dies durch eine signifikante Verbesserung des *Normalized Root Mean Squared Error* (NRMSE) bezüglich der Abweichungen zu den verrauschten Messwerten von 99,1% auf 87,1% belegt.

Trotz der Filterung ist die auf dem (linearen) ARX-Modell basierende Gradientenschätzung mit Unsicherheiten behaftet. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen und den Ansatz robuster gegen die genannten Unsicherheiten zu gestalten, werden die Schrittweite und das BFGS-



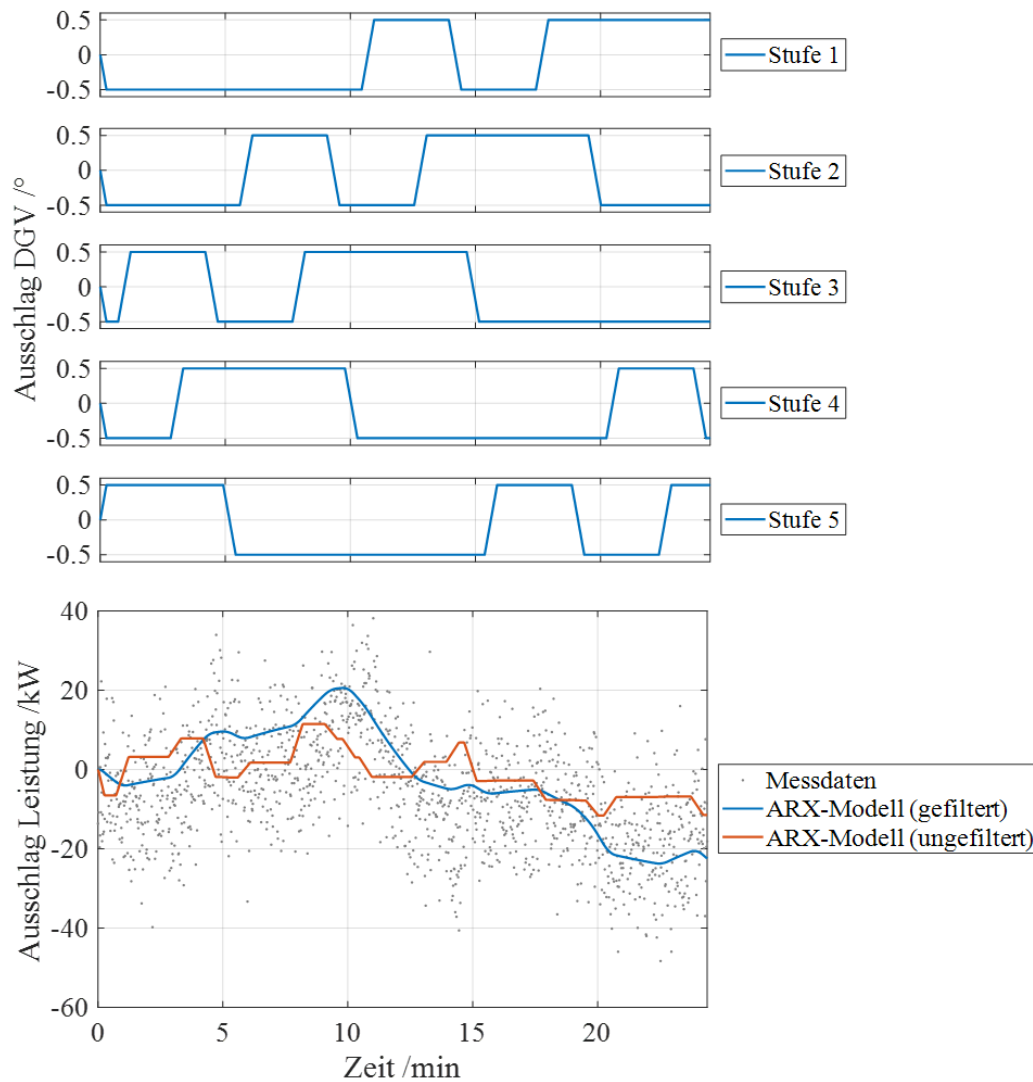


Abb. 12: Anregungsphase der Quasi-Newton Extremum Seeking Control (QNEC);  
 oben) Perturbationssignal der fünf Nachleitgitterstellungen (DGV),  
 unten) gemessene Anlagenreaktion und identifizierte ARX-Modelle, s. Text

Update (der Hesse-Matrix) in der applizierten EWR, der QNEC, abhängig von der Güte des identifizierten ARX-Modells gedämpft. Neben weiteren Detailanpassungen wurde die automatisierte Initialisierung der Hesse-Matrix nach [8] (S. 142 ff.) implementiert und erfolgreich (in Experimenten und Simulationen) erprobt. Diese Maßnahme macht den Ansatz robust gegen eine ungeeignete, vormals willkürliche Parametrierung der initialen Hesse-Matrix.

Für die industrielle Praxis (und die Experimente) sind die Umschaltmomente beim Ein- bzw. Ausschalten der Massenstrom- sowie der Extremwertregelung von hoher Relevanz. Dies betrifft auch Situationen, in denen die Regelkommandos durch manuelle Steuereingriffe oder übergeordnete Sicherheitsroutinen überschrieben werden. Dieser Umstand wird in der Schlussbericht D0-2\_TU Berlin (03SFK3D0-2)18

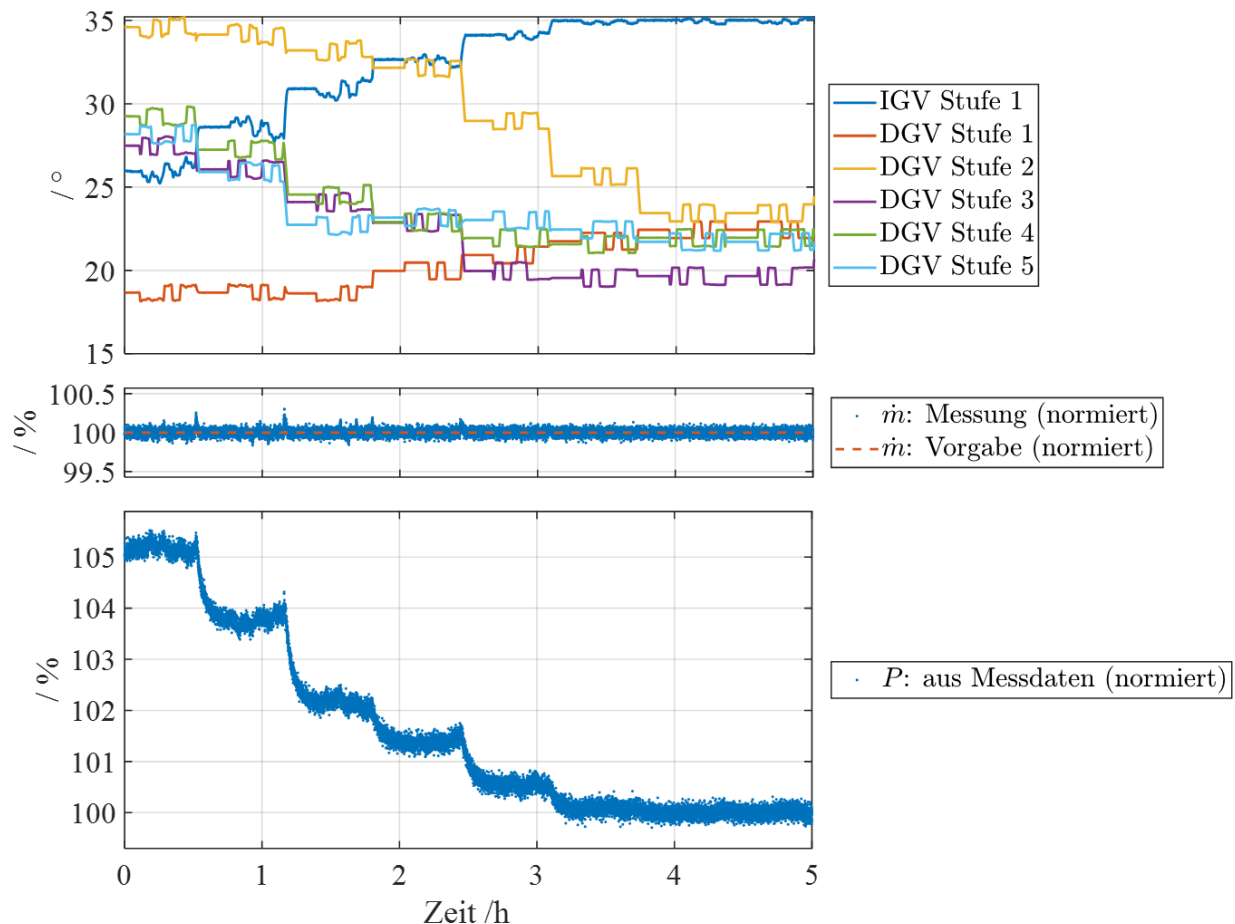


Abb. 13: Simulation mit überarbeitetem Modell und modifizierten Prozessführungs-konzept;  
 oben) Verlauf der Stellkommandos des Reglers,  
 mittig) Massenstromsignal und -vorgabe,  
 unten) Leistung, rekonstruiert aus (Pseudo-)Messdaten wie oben beschrieben

modifizierten Implementierung berücksichtigt, indem die EWR dann neu initialisiert und die Integratorzustände der vorhandenen Massenstromregler derart rekonfiguriert werden, so dass keine Sprünge in den IGV-Stellungen und insgesamt ein weicher Übergang stattfindet.

Ein repräsentativer Ausschnitt der dynamischen Simulation für einen beispielhaften Teillastpunkt ist in Abb. 13 präsentiert. Trotz der von der ursprünglichen Spezifikation stark abweichenden, aber aufgrund der experimentellen Erfahrungen notwendigen Neuausrichtung kann der gewählte Regelungsansatz, die QNESC nach [2], mit entsprechenden Adaptionen weiter erfolgreich zur Online-Leistungsminimierung genutzt werden. In der neu ausgerichteten Simulationsstudie ist das System etwa 21-mal träger, die Messdaten viel stärker verrauscht und das zu minimierende Leistungssignal muss aus diversen (verzögerten, verrauschten) Messungen online bestimmt werden. Das adaptierte Regelungskonzept konvergiert unter den realistischeren Bedingungen lediglich etwa 11-mal langsamer als das ursprüngliche Konzept unter den idealisierten Bedingungen. Das neue Konzept geht zudem von einer kostengünstigeren Instrumentierung

Schlussbericht D0-2\_TU Berlin (03SFK3D0-2)19

eines fünf-stufigen Verdichters aus. Zudem wurden Maßnahmen ergriffen, mit denen die maximalen Abweichungen im geregelten Massenstrom erheblich (hier von 1,5 auf 0,08 kg/s) reduziert werden.

## **2 Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen**

Die Ausgaben bezogen sich entsprechend der Genehmigung auf Personalmittel zur Anstellung des mit den Arbeiten befassten wissenschaftlichen Mitarbeiters sowie auf Reisen zu Projekttreffen.

## **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Um den erwünschten Betrieb von Luftzerlegungsanlagen zukünftig realisieren zu können, sind neben den konstruktiven Weiterentwicklungen, welche die Industrie leisten kann, methodische Entwicklungen eines universitären Partners notwendig. Die Flexibilisierung des Luftverdichters bei gleichzeitig hoher Effizienz der eingesetzten Energie im Teillastbereich erfordert die Ausrichtung moderner Konzepte der Regelungstechnik zur Automatisierung der neu konstruierten Leitapparate. Diese Methoden haben bisher noch keinen Einzug in die einschlägige Industrie gefunden, weswegen diese Ausrichtung ein Forschungsrisiko darstellt, welches in einer industriellen Entwicklung eher gemieden wird.

Die in Abschnitt 1.1 eingehend dargestellten Arbeiten erfüllen die im genehmigten Antrag spezifizierten Ziele. Viele Arbeiten bauen aufeinander auf oder bedingen sich gegenseitig. Würden einzelne Teilarbeiten fehlen, wäre somit der Erfolg des gesamten Arbeitspakets gefährdet. Alle geleisteten Arbeitsschritte waren damit zur Zielerreichung notwendig und angemessen.

## **4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Die Arbeiten der zweiten Förderphase haben in Experimenten an einem einstufigen Prototyp gezeigt, dass der Betriebsbereich eines Radialverdichters bei hoher Effizienz mit einer variablen Diffusorbeschaufelung erweitert werden kann. Mit den dazu von der Antragsstellerin entwickelten Prozessführungskonzepten rückt ein hoch flexibler Anlagenbetrieb einer Luftzerlegungsanlage näher, um sich schwankenden Energieangeboten anzupassen. Die Vorarbeiten lassen erwarten, dass sich diese Ziele auf ein breites Portfolio von mehrstufigen Radialverdichtern übertragen lassen. Damit stehen regelungstechnische Methoden bereit, welche die industriellen Kooperationspartner MAN und Linde zukünftig verwenden können. Da der Anteil stark schwankender erneuerbarer Energien zunehmen wird, kann von einem wachsenden Markt für entsprechende Lösungen ausgegangen werden. Die im Projekt aufgestellten Prozessführungskonzepte, speziell für neu entwickelte Regelorgane, legen für MAN darüber hinaus die Grundlagen, um zukünftig auch für andere Anwendungsgebiete bessere Kompressorlösungen aufbauen zu können als sie derzeit am Markt vorzufinden sind. Aus



universitärer Sicht ist eine wirtschaftliche Ergebnisverwertung im Rahmen von 2-3 Jahren nach Projektabschluss denkbar.

## **5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens**

Während der Projektlaufzeit sind keine Fortschritte auf dem Gebiet des Forschungsvorhabens bekannt geworden.

## **6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses**

Dadurch dass die Experimente stetig verschoben und umgeplant werden mussten und letztendlich erst am Ende der Projektphase stattfinden konnten, wurden auch darauf aufbauende Veröffentlichungen verschoben. Geplant ist, über die entsprechenden Arbeiten und Ergebnisse in einem Zeitraum von 2 Jahren nach Projektende in der anwendungsbezogenen, regelungstechnischen Community zu berichten.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Ecker, Flüggen, Frank, Gentsch, Haider, Heinz, Kender, King, Klein, Mhamdi, Mitsos, Niehuis, Pottmann, Rehfeldt, Schulze, Wacker und Wunderlich, „Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen,“ in *Energieflexibilität in der deutschen Industrie - Band 2: Markt- und Stromsystem, Managementsysteme und Technologien energieflexibler Fabriken*, 2022, pp. 327-341.
- [2] A. Lange und R. King, „Discrete-Step, Quasi-Newton Extremum Seeking Control for Multivariable Real-Time Optimization,“ *IFAC-PapersOnLine*, Bd. 53, Nr. 2, pp. 1608-1613, 2020.
- [3] M. Gentsch und R. King, „Real-time estimation of a multi-stage centrifugal compressor performance map considering real-gas processes and flexible operation,“ *Journal of Process Control*, Bd. 85, pp. 227-243, 2020.
- [4] S. Julier und J. Uhlmann, „Unscented filtering and nonlinear estimation,“ *Proceedings of the IEEE*, Bd. 92, Nr. 3, pp. 401-422, 2004.
- [5] S. Kolås und B. Foss, „Constrained nonlinear state estimation based on the UKF approach,“ *Comput. Chem. Eng.*, Bd. 33, pp. 1386-1401, 2009.
- [6] M. Gentsch und R. King, „Real-time estimation of parameter maps,“ *IFAC-PapersOnLine*, Bd. 53, Nr. 2, p. 2391–2396, 2020.
- [7] Technische Universität Berlin, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, „SynErgie - synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung : Schlussbericht Teilvorhaben: Modellierung und Regelung von Kompressoren mit neuen Leitapparaten,“ Technische Universität Berlin, Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Berlin, 2020.
- [8] J. Nocedal und S. J. Wright, *Numerical Optimization (2nd Edition)*, New York: Springer New York, 2006.