

Ein Beitrag zur patienten-individuellen Regelung in Atemtherapiegeräten zur Behandlung des obstruktiven Schlafapnoesyndroms

Dissertation
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von

Mathias Scheel, geb. am 31. Juli 1989 in Wismar
aus Wismar

Rostock, 6. Mai 2020

Kurzfassung

Im Bereich der Schlafmedizin wird das obstruktive Schlafapnoesyndrom durch die sogenannte CPAP-(Continuous Positive Airway Pressure) Therapie behandelt. Eine obstruktive Apnoe ist durch einen Verschluss der oberen Atemwege über einen längeren Zeitraum gekennzeichnet. Atemtherapiegeräte erzeugen nun einen positiven Überdruck, um die oberen Atemwege pneumatisch zu schienen und so einen Verschluss (Obstruktion) zu verhindern. Der geregelte Druck in der Atemmaske wird durch die Atmung des Patienten gestört. Teilweise ist der Einfluss der Atmung so groß, dass viele CPAP-Geräte die geforderten Therapiegedrücke nicht einhalten können und dadurch die interne Druckregelung erheblich gestört werden kann.

In der vorliegenden Arbeit werden patienten-individuelle Regelungsansätze zur Regelung des Therapiedruckes vorgestellt. Patienten-individuell bedeutet in dem Sinne, dass sich das Regelungskonzept sowohl an den Patienten als auch an dessen Atmung (Atemmuster) anpassen soll. Dafür wird ein Modell des Atemtherapiesystems und des Patienten hergeleitet. Durch Vorhandensein elektro-mechanischer und pneumatischer Bestandteile im Atemtherapiesystem werden kaskadierte Regelungsstrukturen verwendet. Da die Teilmodelle als lineares bzw. linearisiertes Modell vorliegen, können Verfahren aus der linearen Regelungstheorie angewandt werden.

Als Möglichkeit zur Umsetzung patienten-individueller Regelungskonzepte sind 2 Konzepte besonders herausgestochen. Die modellprädiktive Regelung hat sich im Bereich der Raffinerie- und Chemieindustrie bewährt. Es können sowohl Stell- und Zustandsbeschränkungen, als auch zukünftige Sollwerte und Störgrößen berücksichtigt werden. Durch das hergeleitete Modell kann die Atemanstrengung als Störgröße geschätzt und anschließend direkt im Regelgesetz verwendet werden. Durch die Periodizität der menschlichen Atmung kommt auch die iterative lernende Regelung als Regelungskonzept in Frage. Anhand von Informationen, z. B. des Regelfehlers aus einem bereits abgeschlossenen Atemzyklus, kann Einfluss auf den zukünftigen Zyklus genommen werden. Da die Periodendauer von Atemzug zu Atemzug und auch über Nacht leicht variieren kann, wird das Standard-Lerngesetz angepasst. Vorteil dieser Methode ist, dass das Regelkonzept von Atemzyklus zu Atemzyklus lernt.

Beide Regelungskonzepte werden hinsichtlich Umsetzbarkeit auf einem vorhandenen Atemtherapiegerät untersucht. Es werden sowohl die entwickelten Regelungsverfahren als auch Ergebnisse aus der Simulation, der Erprobung an einem Hardwaresimulator und aus realen Messungen am Patienten in der Arbeit diskutiert. Im direkten Vergleich erreichten modellprädiktive und iterative lernende Regelung beim normativen Test eine ähnliche Regelqualität. Bei 4 hPa Therapiedruck konnten beide Ansätze die Regelabweichung durchschnittlich auf 0,40 bzw. 0,30 hPa reduzieren. Die Ergebnisse liegen damit unter der geforderten Druckabweichung von 0,50 hPa. Die ausführlichen Tests am Lungensimulator und die Untersuchungen an drei freiwilligen Probanden hatten gezeigt, dass die Regelungsansätze auch für unterschiedliche Patienten mit unterschiedlichen Atemanstrengungen und variierenden Atemfrequenzen geeignet sind.

Abstract

The obstructive sleep apnoea syndrome is treated using the CPAP-(Continuous Positive Airway Pressure) therapy. An obstructive apnoea is characterized by a collapse of the upper respiratory tracts over a longer period of time. The breathing therapy device generates a positive airway pressure to splint the upper respiratory tracts and to prevent a collapse (obstruction). The controlled pressure in the breathing mask is disturbed by the breathing of the patient. Many CPAP-devices cannot maintain the adjusted pressure setpoints due to the significant influence of the breathing. The internal pressure control is disturbed.

The intention of the thesis is to introduce patient-individual control concepts to maintain the therapy pressure. Patient-individual means, that the control concepts can adapt to the patient as well as to the breathing (breathing pattern). Therefore, a model of the breathing therapy system and the patient is derived. Due to the presence of electro-mechanic and pneumatic parts, a cascaded control environment is used. Because the component models exist as a linear or as linearised models, the procedure of linear control theory can be used.

For implementation of patient-individual control concepts, two methods particularly stand out. The model predictive control has proven in the field of refinery and chemical industry. Using a model predictive control a consideration of constraints and also future references and disturbances is possible. The developed model was able to estimate the breathing effort as the disturbance, which was directly included in the control law. That motivates the use of this method. Through the periodicity of human breathing the iterative learning control is also applicable as a control technique. Based on previous information of a completed breathing cycle, the execution of the present one can be influenced. Because the time period may change small from breath to breath or vary more during the night, the standard iterative learning control law was adapted. Advantage of the procedure is the ability to learn from breathing cycle to breathing cycle.

Both control concepts are developed on an existing breathing therapy device for feasibility. The developed control methods as well as the results from the simulation, the tests on a hardware simulator and patient measurements are discussed. In comparison of the model predictive control and the iterative learning control both control strategies achieved a similar control quality in the normative test. At 4 hPa, both approaches were able to reduce the control deviation to 0.40 and 0.30 hPa on average. The results are thus below the required pressure deviation of 0.50 hPa. The extensive tests on the lung simulator and the examinations on three volunteers had shown that the control approaches are also suitable for different patients with different breathing efforts and varying breathing frequencies.