

**2. Workshop
Automatisierungstechnische
Verfahren für die Medizin vom
25. bis 26. Feb. 1999 in
Darmstadt**



**„Simulation des menschlichen Herz-Kreislauf-Systems zur
Analyse physiologischer Regelprozesse und
kardiologischer Problemstellungen“**

D. Böhringer, M. Hexamer, M. Meine, J. Werner
Abteilung für Biomedizinische Technik, Medizinische Fakultät, Ruhr-Universität-Bochum,
Bochum, Deutschland
E-Mail:boehring@biomed.ruhr-uni-bochum.de

ISBN: 318318317x
Pages: 28-29

Simulation des menschlichen Herz/ Kreislauf- Systems zur Analyse physiologischer Regelprozesse und kardiologischer Problemstellungen

Böhringer D., Hexamer M., Meine M., Werner J.

Abteilung für Biomedizinische Technik
Medizinische Fakultät, Ruhr-Universität, 44770 Bochum
email: boehring@biomed.ruhr-uni-bochum.de

Einleitung

Da invasive Experimente am Menschen nicht immer durchführbar sind, ist eine realitätsnahe numerische Simulation des menschlichen Herz/ Kreislaufsystems erforderlich. Bisher veröffentlichte Herz/ Kreislauf-Modelle sind entweder zur Untersuchung kurzfristiger, weitgehend strömungsmechanisch und muskelphysiologisch bedingter Herz/ Kreislaufphänomene auf der einen Seite (Guyton [1], Hardy [2], Urbaszek [3]) und mittel- bzw. langfristiger Kreislaufregulationsprozesse (Guyton [4]) auf der anderen Seite geeignet. Modelle der erstgenannten Kategorie vernachlässigen meist die Kreislaufregulationsprozesse und machen keine Aussagen über metabolische Parameter, wie die Sauerstoffaufnahme und die gemischtvenöse Sauerstoffsättigung unter körperlicher Belastung. Modelle der zweitgenannten Kategorie dagegen betrachten den pulsatile Charakter des Herzzyklus nicht zeitaufgelöst («beat to beat»). Für die Analyse physiologischer Regelprozesse und kardiologischer Problemstellungen erscheint ein gekoppeltes Modellsystem notwendig, das Elemente beider Modellkategorien in sich vereint.

Methodik

Die eine Komponente des hier vorgestellten, gekoppelten Modellsystems basiert im wesentlichen auf dem von Guyton entwickelten, wohletablierten großen Modell der Herz/ Kreislauf- Regulation (Guyton-Modell). Dieses Modell berücksichtigt alle kreislaurelevanten Organsysteme mit deren Interaktionen auch unter dem Einfluß körperlicher Arbeit (Abbildung 1). Es wurde von uns um verschiedene Prozeßkomponenten (z.B. zur Simulation der Herzschrittsteuerung durch die gemischtvenöse Sauerstoffsättigung) erweitert.

Die zweite Komponente wurde von uns auf Grundlage von physikalischen Gleichungen aus der Strömungsmechanik und dem aktuellen Kenntnisstand der Herz/ Kreislaufphysiologie neu entwickelt, um zeitaufgelöst intrakardiale Einflüsse auf die Gesamtfunktion des Herz/ Kreislaufsystems untersuchen zu können (Abbildung 2). Besondere Sorgfalt wurde auf die Wahl physiologisch begründeter Modellparameter verwandt.

Beide Modellkomponenten sind in der Programmier-

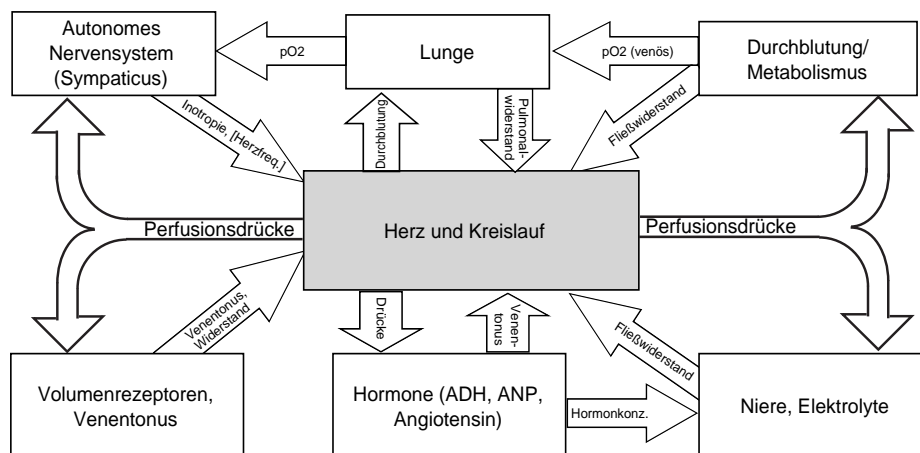


Abbildung 1: Komponenten des modular aufgebauten Guyton- Modelles mit den entsprechenden Interaktionen. Das Herz/ Kreislauf- Modul wurde von uns neu entwickelt und ersetzt die originale Modellkomponente.

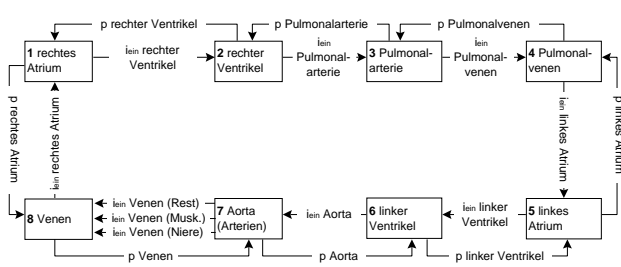


Abbildung 2: Ansatz des neu entwickelten Herz/ Kreislauf-Modelles. Symbolerklärung: p steht für einen Druck [mmHG], iein für eine Flußrate [l/min]

sprache C implementiert und kommunizieren über einen definierten Parametersatz: Die hämodynamischen Zustandsgrößen werden von der neu entwickelten pulsatilen Komponente, die metabolischen und regulatorischen Variablen von dem Guyton-Modell berechnet.

Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, daß alle Zustandsvariablen (Drücke, Kompartimentvolumina, Flußgeschwindigkeiten) in Ruhe und unter Belastung sowohl der beiden isolierten Modellkomponenten als auch die des gekoppelten Modellsystemes in den Streubereichen von publizierten Untersuchungen an Normal-kollektiven liegen. Auch die Dynamik der einzelnen Zustandsvariablen (Druck- und Flußkurven) stimmt mit experimentellen Untersuchungen gut überein (Abbildung 3).

Ferner konnte das Modellsystem typische Charakteristika unterschiedlicher pathophysiologischer Zustände wie z.B. Klappenvitien und Störungen der diastolischen Funktion nachvollziehen.

Das Ergebnis der Simulation eines frequenzadaptiven Schrittmachersystemes auf Basis der gemischtvenösen Sauerstoffsättigung und eines Proportionalreglers ist

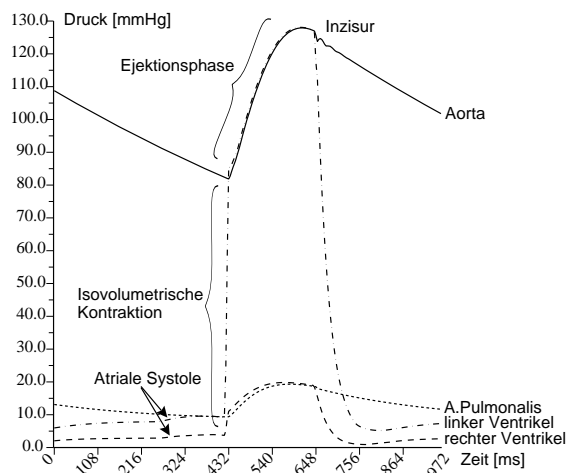


Abbildung 3: Simulierter Druckverlauf in den beiden Ventrikeln und großen Arterien über einen Herzzyklus.

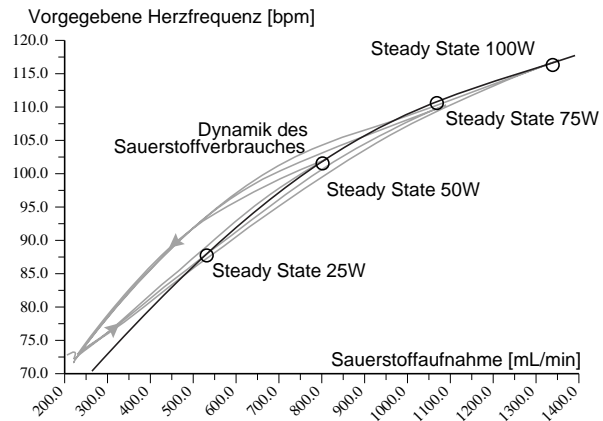


Abbildung 4: Steuerung der Herzfrequenz mit der gemischtvenösen Sauerstoffsättigung. Regressionskurve durch Steady-State-Werte. Die grauen Schleifen geben die transienten Phasen wieder (für 25 Watt nicht abgebildet).

in Abbildung 4 wiedergegeben: Ein solches System könnte den Modellvorhersagen zufolge die physiologische Proportionalität von Herzfrequenz und Sauerstoffaufnahme (linear mit dem Belastungsgrad korreliert) nicht wiederherstellen, was mit Überlegungen von Hexamer [5] in Einklang steht.

Schlussfolgerung

Das Modell hat sich unter den bisher durchgeführten Untersuchungen bewährt und sollte zur weitergehenden Analyse kardiologischer Fragestellungen wie z.B. frequenzadaptive Herzschrittmachersysteme genutzt und weiterentwickelt werden. Bevor sich allerdings Konsequenzen für den Einsatz am Menschen ergeben, sind nach wie vor klinische Studien zur Validierung der Modellvorhersagen erforderlich.

Literatur

- [1] Guyton A.C., Jones C.E., Cardiac output and its Regulation, Saunders Philadelphia, 1973
- [2] Hardy H.H., Collins R.E., Calvert R.E., A digital model of the human circulatory system. Medical and Biological Engineering 1982:30, Seiten 550-564
- [3] Urbaszek A., Schaldach M., A numerical heart and circulation model to simulate hemodynamics for rate responsive pacing, In Advances in Fluid Mechanics, Volume 3, Seiten 129-159, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, 1995
- [4] Guyton A.C., Coleman T.G. et al., Circulation: Overall regulation. Ann. Rev. Physiology, Seiten 13-43, 1972.
- [5] Hexamer M., Werner J., Gemischtvenöse Sauerstoffsättigung als Steuergröße für die Herzschrittmacherfrequenz: Optimierung des Regelalgorithmus, Biomedizinische Technik 1996, Band 41, Ergänzungsband 1, Seiten 440-441