

Auswertung von Testbolusdaten

Untersuchungsplanung und Berechnung von Herzfunktionsparametern

Anja Hennemuth¹, Andreas Mahnken², Ernst Klotz³, Kerstin Wolsiffer³
Leonie Dreschler-Fischer¹ und Werner Hansmann¹

¹Fachbereich Informatik der Universität Hamburg, 22257 Hamburg

²Radiologie des Universitätsklinikums der RWTH Aachen, 52057 Aachen

³Siemens Medical Solutions Forchheim, 91031 Forchheim

Email: 6hennemu@informatik.uni-hamburg.de

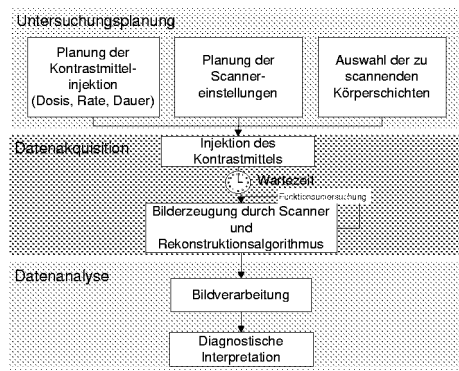
Zusammenfassung. Bei der Kontrastmittel-Computertomographie erhält die Untersuchungsplanung durch das Problem der zeitlichen Abstimmung von Injektion und Aufnahmezeitraum eine verstärkte Bedeutung. Zur Planungsunterstützung wurde ein Verfahren implementiert, das anhand einer *Testbolus*-Sequenz die zu erwartenden Dichte-Werte einer Region für beliebige Injektioneinstellungen und Scanintervalle simuliert. Die zur Planung erzeugten Testmessungen entsprechen einer dynamischen Untersuchung. Daher wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem Herzfunktionsparameter aus der erzeugten *Testbolus*-Sequenz abgeleitet werden können. Die vorgestellten Verfahren wurden jeweils anhand der Auswertung aus *Testbolus*-Sequenz und CT-Untersuchung bestehender Datensätze getestet. Der Vergleich der simulierten mit den gemessenen Zeit-Dichte-Kurven und die Gegenüberstellung der aus *Testbolus*-Sequenz und Untersuchungsdaten ermittelten Herzfunktionsparameter zeigen vielversprechende Ergebnisse.

1 Einleitung

Computertomographische Untersuchungen finden heutzutage vielfältige Anwendung sowohl bei der Bildgebung anatomischer Regionen als auch bei Funktionsuntersuchungen. Da die Computertomographie eine Strahlenbelastung des Patienten mit sich bringt und daher nicht unnötig wiederholt werden sollte, ist hier eine gute Planung der Untersuchung besonders wichtig. Werden Kontrastmittel benutzt, verstärkt sich die Bedeutung der Planung noch, da hier auch die zeitliche Abstimmung von Kontrastmittelinjektion und Aufnahmebeginn zu berücksichtigen ist (siehe Abb. 1).

Zur Planung von Kontrastmittel-Computertomographien existieren im wesentlichen drei Ansätze: die Planung anhand bekannter Patientenparameter und Richtlinien, das *Bolus-Tracking* und das Schätzen der optimalen Einstellungen mittels einer *Testbolus*-Sequenz.

Beim *Bolus-Trackings* wird zunächst eine zu beobachtende Schicht ausgewählt, in deren Abbildung eine auszuwertende Bildregion definiert wird. Nach

Abb. 1. Ablauf einer CT-Untersuchung mit Kontrastmittel

Injektion des Kontrastmittels wird mit niedriger Strahlendosis die ausgewählte Schicht wiederholt gescannt, bis in der definierten Bildregion die mittlere Dichte einen gegebenen Schwellwert erreicht, um dann mit der Aufnahme zu beginnen.

Zur Erzeugung einer *Testbolus*-Sequenz werden Schicht und Bildregion ähnlich wie beim *Bolus-Tracking* bestimmt. Dann wird nach Injektion einer geringen Kontrastmittelmenge mit niedriger Strahlendosis eine Bildsequenz erzeugt [1,2]. Aus den jeweiligen Dichte-Werten in der definierten Bildregion kann dann eine Zeit-Dichte-Kurve abgeleitet werden, auf deren Basis die optimalen Einstellungen für Kontrastmittelinjektion und Scanintervall geschätzt werden können [3]. Gegenüber dem *Bolus-Tracking* ergibt sich hier der Vorteil, daß neben dem Scanintervall auch die Injektionsparameter individuell angepaßt werden können.

Die hier vorgestellte Unterstützung der Untersuchungsplanung verwendet einen systemtheoretischen Ansatz zur Simulation von zu erwartenden Zeit-Dichte-Kurven bei Variation der Injektionseinstellungen, so daß der Planung Schätzungen mit einem mathematisch fundierten Konzept zugrundegelegt werden können.

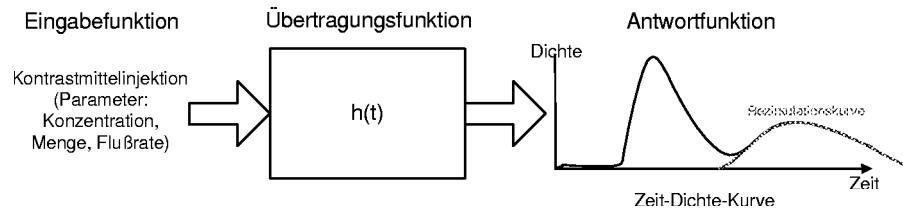
Die Erzeugung einer *Testbolus*-Sequenz entspricht im Grunde genommen selbst schon einer dynamischen Kontrastmitteluntersuchung wie in Abb. 1 dargestellt und kann daher auch diagnostisch ausgewertet werden. Hier ist ein Verfahren zur Ableitung von Herzfunktionsparametern aus der Zeit-Dichte-Kurve einer *Testbolus*-Sequenz implementiert worden, das bereits in den 1980er Jahren entwickelt worden ist, aber nur in Tierversuchen getestet wurde [4,5].

2 Methoden

Simulation von Zeit-Dichte-Kurven anhand von Testbolus-Sequenzen.

Zur Simulation der zu erwartenden Dichte-Kurve bei Variation der Injektionsparameter wie Kontrastmitteldosis, Jod-Konzentration des Kontrastmittels oder Flußrate anhand der *Testbolus*-Sequenz ist hier ein systemtheoretischer Ansatz

Abb. 2. Lineares zeitinvariantes System zur Modellierung des Zusammenhangs zwischen Kontrastmittelinjektion und der Zeit-Dichte-Kurve einer betrachteten Bildregion



implementiert worden. Dabei ergibt sich die Eingabefunktion aus den gewählten Injektionsparametern, während die gemessene Zeit-Dichte-Kurve die zugehörige Antwortfunktion darstellt (siehe Abb. 2).

Es läßt sich dann die Veränderung einer Zeit-Dichte-Kurve bei Variation der Injektionsparameter direkt aus der Veränderung der Injektionskurve ableiten. Hier ist die Zeit-Dichte-Kurve der *Testbolus*-Sequenz mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems so zerlegt worden, daß sie als Summe identischer zeitverschobener Kurven dargestellt werden kann, die jeweils der Antwort auf eine Kontrastmittelinjektion mit nur $2s$ Injektionsdauer entsprechen. Die möglichen Injektionskurven können durch Skalierung, Verschiebung und Addition einer $2s$ -Injektion dargestellt werden, und zur Modellierung der entsprechenden Antwortkurve werden dieselben Operationen auf die Antwortkurve der $2s$ -Injektion angewandt.

Die Rezirkulation des Kontrastmittels wird durch die *Testbolus*-Sequenz in der Regel nicht vollständig erfaßt, so daß der weitere Kurvenverlauf modelliert werden muß. Die drei hier getesteten Ansätze sind die Annahme des Kurvenabbruchs nach Ende der Messung, die Fortsetzung der Kurve mit dem letzten gegebenen Messwert und das Anpassen des Modells der Gamma-Variate, das eine typische Zeit-Dichte-Kurve ohne Rezirkulation beschreibt.

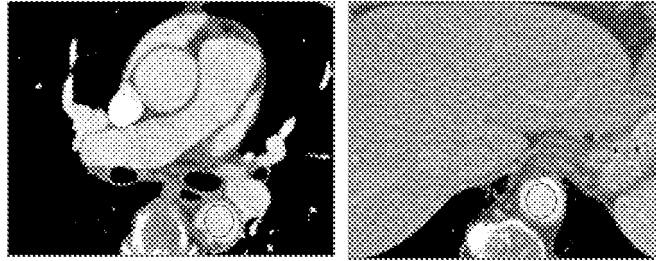
Durchgeführte Messungen. Um die Anwendbarkeit des Verfahrens zu testen, sind anhand von 17 Testboli Simulationen durchgeführt worden. Die eingestellten Parameter für die Injektion und das Scanintervall entsprachen dabei den bei dem anschließenden Spiralscan verwendeten Einstellungen. Die ausgewertete Bildregion lag im Darstellungsbereich der Aorta descendens, die in sämtlichen Bildern der *Testbolus*-Sequenz und des Spiraldatensatzes identifizierbar war (siehe Abb. 3).

Die räumliche Verschiebung zwischen den Schichtbildern des Spiraldatensatzes wurde aufgrund der hohen Flußgeschwindigkeit des Blutes in der Aorta descendens vernachlässigt.

Für die gegebenen Zeit-Dichte-Kurven wurden jeweils Ende und mittlere Höhe des Dichte-Plateaus ermittelt.

Ableitung von Herzfunktionsparametern aus *Testbolus*-Sequenzen. Zur Bestimmung von Herzfunktionsparametern aus *Testbolus*-Sequenzen wird hier zunächst das Herzzeitvolumen nach der *Stewart-Hamilton-Gleichung* (1) berechnet.

Abb. 3. Zur Überprüfung der Vorhersage ausgewertete Bildregion in verschiedenen Bildern der Spiral-Sequenz



$$\text{Herzzeitvolumen} \left[\frac{l}{min} \right] = \frac{\text{Injizierte Jodmenge [mg]}}{\int_0^{\infty} c(t) dt \left[\frac{mg}{l} \cdot min \right]} \quad (1)$$

Mit $c(t)$ ist hier die Kontrastmittelkonzentrationskurve ohne Berücksichtigung der Rezirkulation gemeint. Das heißt, um die Gleichung anwenden zu können, ist hier zunächst durch Anpassung der Gamma-Variate an die gemessenen Zeit-Dichte-Werte eine rezirkulationskorrigierte Kurve berechnet worden, deren Dichte-Werte dann mit Hilfe der Proportionalitätskonstante in Konzentrationswerte konvertiert werden, so daß eine Anwendung der Gleichung möglich wird.

Durchgeführte Messungen. Zur Beurteilung des implementierten Verfahrens sind in 25 Datensätzen aus der gegebenen *Testbolus*-Sequenz jeweils drei Zeit-Dichte-Kurven erzeugt worden. Dazu wurden Bildregionen ausgewertet, die jeweils die Aorta descendens, die Aorta ascendens und die Pulmonalarterie repräsentieren. Aus den so erzeugten Kurven wurde mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens das Herzzeitvolumen berechnet.

Zum Vergleich wurde aus der jeweils korrespondierenden 3D-Sequenz des Herzens mit Hilfe der volumenbasierten Applikation *Argus*, die bereits in der klinischen Anwendung ist, durch Segmentierung der Kammervolumina zunächst das Schlagvolumen und daraus das Herzzeitvolumen bestimmt.

3 Ergebnisse

Unterstützung der Untersuchungsplanung. Der Vergleich der Vorhersagen des Kurvenabstiegsbeginns mit dem aus der Referenzmessung geschätzten Wert ergab Korrelationen von 0.6842, 0.6879 und 0.6141 für die drei getesteten Methoden zur Kurvenfortsetzung mit direktem Abbruch am Ende der Sequenz, Fortsetzung mit dem letzten Meßwert und Anpassung der Gamma-Variate ($p < 0.01$). Die Abweichung beträgt im Mittel 3.71, 1.60 und 3.04s, wobei der Abstiegsbeginn in der Regel zu früh angenommen wird. Die Korrelation der vorhergesagten mittleren Plateau-Höhe ist dagegen mit Werten von 0.3528, 0.4664 und 0.4848 deutlich geringer. Eine Verwerfung der Nullhypothese ist hier mit $p < 0.05$ nur bei Verwendung der angepaßten Gamma-Variate zulässig.

Berechnung von Herzfunktionsparametern. Die mit dem vorgestellten Verfahren ermittelten Werte für das Herzzeitvolumen zeigen für die ausgewerteten Bildregionen, die die Aorta descendens und die Aorta ascendens repräsentieren, mit 0.8352 und 0.8698 deutliche Korrelationen mit den *Argus*-Ergebnissen ($p < 0.0001$). Für die dritte Bildregion, die die Arteria pulmonalis darstellt, ist die Korrelation mit 0.4596 ($p < 0.05$) deutlich geringer.

4 Diskussion

Die Simulation der Zeit-Dichte-Kurve einer Region anhand einer gegebenen *Testbolus*-Sequenz und der dabei verwendeten Injektions- und Zeitparameter hat bei der Schätzung des Kurvenverlaufs für die untersuchten Datensätze gute Ergebnisse geliefert. Die hier auftretenden Abweichungen der Vorhersagen bei der Kurvenhöhe sind wahrscheinlich auf die unzureichende Erfassung der Rezirkulation durch die *Testbolus*-Sequenz zurückzuführen und können durch eine geeignete Modellierung der Rezirkulationskurve verringert werden. Dann bietet dieses Werkzeug eine gute Hilfe bei der Planung von Kontrastmittel-Computertomographien.

Die mit Hilfe des implementierten Verfahrens berechneten Werte für das Herzminutenvolumen zeigen eine deutliche Korrelation mit den durch die Applikation *Argus* ermittelten Werten. Durch den geringen Benutzungs- und Berechnungsaufwand bei der Auswertung der zur Untersuchungsplanung erzeugten Zeit-Dichte-Kurven ist dieses Verfahren ein gutes Add-on zu einer solchen Planung.

Literaturverzeichnis

1. Birnbaum BA, Jacobs JE, Langlotz CP, Ramchandani P: Assessment of a bolus-tracking technique in helical renal CT to optimize nephrographic phase imaging. *Radiology* 1(211):87–94, 1999.
2. Stückle CA, Kickuth R, Liermann D, Kirchner J: Beobachtung der Dichteanstiegs-kurve nach intravenöser Kontrastmittelapplikation unter Verwendung eines Bolustriggerungssystems. *Radiologe* 42(6):480–484, 2002.
3. Fleischmann D: Present and future trends in multiple detector-row CT applications: CT angiography. *Eur Radiol* 12:11–16, 2002.
4. Garrett JS, Lanzer P, Jaschke W et. al.: Measurement of Cardiac Output by Cine Computed Tomography. *American Journal of Cardiology* 56:657–661, 1985.
5. Rumberger JA, Lipton MJ: Ultrafast Cardiac CT Scanning. *Cardiology Clinics* 7(3):713–734, 1989.