Band 67



Kristin Dietz-Laursonn

Evaluierung und Optimierung der Fragmentationseffektivität eines piezoelektrischen Stoßwellenlithotripters



Aachener Beiträge zur Medizintechnik

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Dr. h. c. Steffen Leonhardt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

Evaluierung und Optimierung der Fragmentationseffektivität eines piezoelektrischen Stoßwellenlithotripters

Evaluation and Optimization of the Fragmentation Effectiveness of a Piezoelectric Shockwave Lithotripter

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Kristin Dietz-Laursonn

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Olivier

Tag der mündlichen Prüfung: 25.08.2021

Aachener Beiträge zur Medizintechnik Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Dr. h. c. Steffen Leonhardt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher Univ.-Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Thomas Schmitz-Rode

Kristin Dietz-Laursonn

Evaluierung und Optimierung der Fragmentationseffektivität eines piezoelektrischen Stoßwellenlithotripters

Ein Beitrag aus dem Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen (Direktor: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Radermacher).

RWTHAACHEN UNIVERSITY

Shaker Verlag Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2021)

Copyright Shaker Verlag 2021 Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8337-8 ISSN 1866-5349

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren Telefon: 02421/99011-0 • Telefax: 02421/99011-9 Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Zusammenfassung

Die extrakorporale Stoßwellenlithotripsie ist eine nichtinvasive Therapiemöglichkeit des Harnsteinleidens. Bei der Therapie werden die Steine mit fokussierten Schallwellen fragmentiert und anschließend über den Urin ausgeschieden. Zurückbleibende Restfragmente können Steinneubildungen begünstigen und sollten daher vermieden werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung der Stoßwellenlithotripsie durch Erzeugung kleinerer Konkremente ohne Verstärkung der Nebenwirkungen. Hierzu wurde zunächst eine in-vitro Steinfragmentationsumgebung entwickelt, mit der die Fragmentationseffektivität verschiedener Lithotripterschallfelder experimentell ermittelt werden kann. Die Fragmentationsumgebung besteht aus einem künstlichen Harnstein, der mit einer Halterung in einem Wasserbecken relativ zum Fokus des Stoßwellenlithotripters positioniert wird. Nach der Stoßwellenbehandlung werden die Fragmente mittels Siebanalyse ausgewertet.

Basierend auf Schallfeldmessungen des verwendeten Lithotripters und theoretischen Überlegungen der Fragmentationsmechanismen wurden Hypothesen aufgestellt, die eine erhöhte Fragmentationseffektivität gegenüber der Standardbehandlung (Stein im Fokus des Schallwandlers) vermuten lassen. Diese Hypothesen wurden durch experimentelle Untersuchungen in der Steinfragmentationsumgebung bestätigt. So ergibt eine Ausrichtung des Steins 1,5 cm im Vorfokus eine signifikante Steigerung der Fragmentationseffektivität gegenüber der Standardbehandlung. Eine Kombination aus der Behandlung im Vorfokus für 250 Pulse gefolgt von einer Fokusbehandlung mit weiteren 250 Pulsen erhöht die Effektivität geringfügig weiter. Weitere Messungen ergaben bei einer Steinverschiebung von mehr als 5 mm aus dem Fokus orthogonal zur akustischen Achse eine signifikante Abnahme der Fragmentationseffektivität, weshalb Respirationseffekte zu einer deutlichen Verschlechterung der klinischen Behandlungsergebnisse führen können.

Neben der experimentellen Umgebung wurde ein Simulationsmodell zur Berechnung der Fragmentationseffektivität eines Schallfeldes erstellt. Hierfür wird das Tuler-Butcher-Bruchkriterium verwendet, dessen Materialkonstanten über experimentelle Untersuchungen bestimmt wurden. Für den Großteil der untersuchten Schallfelder konnte eine gute Korrelation zwischen experimentellen und simulativen Ergebnissen festgestellt werden. Da das Simulationsmodell jedoch nicht abschließend validiert werden konnte, wurde es nicht für weitere Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit genutzt. Als ein Hauptproblem wird der signifikante Einfluss der Kavitation auf den Unterdruckanteil der Stoßwellen vermutet, der in der Simulation nur ungenügend berücksichtigt werden kann.

Summary

Extracorporeal shockwave lithotripsy is a non-invasive treatment option for urinary stone disease. During therapy, the stones are fragmented using focused sound waves and then excreted with the urine. Remaining fragments can promote the formation of new stones and should therefore be avoided.

The aim of this work is to optimize shockwave lithotripsy by generating smaller calculi without increasing the side effects. For this purpose, an in-vitro stone fragmentation environment was developed with which the fragmentation effectiveness of different lithotripter sound fields can be determined experimentally. The fragmentation environment consists of an artificial urinary stone that is positioned in a water basin relative to the focus of the shockwave lithotripter. After shockwave treatment, the fragments are evaluated using sieve analysis.

Based on sound field measurements of the lithotripter used and theoretical considerations on the fragmentation mechanisms, hypotheses were drawn up that suggest increased fragmentation effectiveness compared to the standard treatment (stone in the focus of the sound transducer). These hypotheses have been confirmed by experimental studies using the stone fragmentation environment. Aligning the stone 1,5 cm in the pre-focus results in a significant increase of the fragmentation effectiveness compared to the standard treatment. A combination of the treatment in the pre-focus for 250 pulses followed by a focus treatment with 250 pulses increases the effectiveness slightly further. Additional measurements showed that a stone displacement of more than 5 mm from the focus orthogonal to the acoustic axis leads to a significant decrease of the fragmentation effectiveness, which is why respiratory effects can lead to a significant deterioration of clinical treatment results.

In addition to the experimental environment, a simulation model was created to calculate the fragmentation effectiveness of a sound field. For this purpose, the Tuler-Butcher fracture criterion is used and its material constants were determined through experimental investigations. A good correlation between experimental and simulative results was found for the majority of the sound fields examined. However, since the simulation model could not be finally validated, it was not used for further investigations in the context of this work. One of the main problems is assumed to be the significant influence of cavitation on the negative pressures of the shockwaves, which cannot be adequately taken into account with the simulation.

Inhaltsverzeichnis

1		1					
2	Hintergrund						
	2.1	Medizinische Grundlagen der Urolithiasis					
		2.1.1	Anatomie des Harnsystems	5			
		2.1.2	Entstehung und Zusammensetzung von Harnsteinen	6			
		2.1.3	Behandlungsmöglichkeiten	9			
	2.2	Physik	alische Grundlagen	14			
		2.2.1	Stoßwellen	15			
		2.2.2	Wechselwirkungen von Schallwellen mit Fluiden und Festkörpern	17			
		2.2.3	Bruchmechanik	19			
	2.3	Fragm	entationswirkung von Stoßwellen	23			
		2.3.1	Fragmentationsmechanismen	23			
		2.3.2	Zusammenspiel der Fragmentationsmechanismen	29			
		2.3.3	Einfluss des Harnsteins auf die Fragmentation	30			
		2.3.4	Einfluss des Schallfeldes auf Nebenwirkungen	31			
	2.4	Motiva	ation und Zielsetzung der Arbeit	33			
3	Experimentelle Umgebung 3						
	3.1	Stoßw	ellengerät	35			
	3.2	Messbecken					
	3.3	Schallfeldmessung					
	3.4	Kavitationsmessung		38			
	3.5	3.5 Steinfragmentationsumgebung		40			
		3.5.1	Herstellung und Charakterisierung von Harnsteinphantomen	40			
		3.5.2	Steinhalterung	43			
		3.5.3	Analyse von Harnsteinfragmenten	47			
	3.6	Diskus	ssion der experimentellen Umgebung	51			
4	Cha	rakteri	sierung der Stoßwellenquelle	57			
	4.1	Sensiti	ivitätsanalyse der Referenzfragmentation	57			
		4.1.1	Festlegung der Referenzfragmentation	57			
		4.1.2	Umgebungsmedium	57			
		4.1.3	Pulsanzahl	59			

		4.1.4	Erreichte Positionsgenauigkeit 6	1							
		4.1.5	Reproduzierbarkeit der Fragmentationsergebnisse 6	2							
	4.2	Unters	uchung der Schallfelder F1, F2 und F3 6	3							
		4.2.1	Fragmentationsanalyse 6	3							
		4.2.2	Schallfeldmessung 6	4							
		4.2.3	Kavitationsmessung 6	7							
5	Analyse von Optimierungsansätzen 69										
	5.1	nechanik	9								
	5.2	Neben	wirkungen	0							
	5.3	Hopkir	ns-Effekt und Kavitation	6							
	5.4	Squeez	ting	9							
	5.5	Kegelf	örmige Erosion	0							
	5.6	Einflus	s der Stoßwellenparameter 8	0							
	5.7	Schallf	eldanpassung über den Behandlungsverlauf	4							
	5.8	Zusam	menfassung der resultierenden Hypothesen	9							
6	Experimentelle Untersuchungen 91										
	6.1	Materia	al und Methoden	1							
	6.2	Unters	uchung der Optimierungshypothesen	2							
		6.2.1	Steinpositionierung im Vorfokus (H1)	2							
		6.2.2	Radiale Steinverschiebungen aus dem Fokus (H2) 9	3							
		6.2.3	Radiale Variation des Fokusortes (H3) 94	4							
		6.2.4	Kombination der Behandlung im Vorfokus und Fokus (H4) 9	6							
	6.3	Diskus	sion der experimentellen Untersuchungen	9							
7	FEM Simulation der Harnsteinzertrümmerung 103										
	7.1	Simula	tionsmodelle in der Literatur	3							
	7.2	Simula	tionsmodell	5							
		7.2.1	Simulation der Materialspannungen im Harnsteinphantom 10	5							
		7.2.2	Berechnung der Harnsteinschädigung 11	6							
	7.3	Verifik	ation des Simulationsmodells	1							
	7.4	Sensiti	vitätsanalyse des Simulationsmodells	5							
		7.4.1	Messunsicherheiten der Materialparameter	6							
		7.4.2	Ausrichtung des Steins im Schallfeld	8							

		7.4.3	Schallfeldbearbeitung zur Kavitationsberücksichtigung	129						
		7.4.4	Anwendung weiterer Bruchtheorien	131						
	7.5	Diskus	sion des Simulationsmodells	132						
8	Disk	ussior	und Ausblick	139						
Lit	Literaturverzeichnis									
Anhang										
	А	In-vitro Steinfragmentationsumgebung								
		A.1	Harnsteinphantome	167						
		A.2	Steinhalterung	190						
		A.3	Siebanalyse	191						
	В	Bearbeitung der Messsignale für die FEM-Simulationen								
	С	Zusätzl	iche Abbildungen und Tabellen	200						