

Aus der Klinik für Urologie im Klinikum Leverkusen
Akademisches Lehrkrankenhaus für die Universität zu Köln
Direktor: Privatdozent Dr. med. J. Zumbé

Einfluss der Koppelsituation auf die extrakorporale Zertrümmerung von Nierensteinen.
Eine experimentelle Untersuchung

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Konrad Lang
aus Bad Orb

promoviert am 27. November 2013

Aus der Klinik für Urologie im Klinikum Leverkusen
Akademisches Lehrkrankenhaus für die Universität zu Köln
Direktor: Privatdozent Dr. med. J. Zumbé

Einfluss der Koppelsituation auf die extrakorporale Zertrümmerung von Nierensteinen.
Eine experimentelle Untersuchung

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Konrad Lang
aus Bad Orb

promoviert am 27. November 2013

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln
2013

Dekan: Universitätsprofessor Dr.med. Dr. h.c. Th. Krieg

1. Berichterstatterin/Berichterstatter: Privatdozent Dr. med. J. Zumbé
2. Berichterstatterin/Berichterstatter: Universitätsprofessor Dr. med. U. Engelmann

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Unterstützung eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch in Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.



Köln, 23.02.2013

Konrad Lang

Die Experimente wurden von mir in dem Versuchslabor der Firma AST Advanced Shockwave Technology GmbH in Jena durchgeführt.

Die Gesamtheit der dieser Arbeit zugrunde liegenden Daten wurden von mir selbst statistisch erfasst und ausgewertet.

Danksagung

Mein persönlicher Dank gilt Herrn Privatdozent Dr. J. Zumbé, der mir die Möglichkeit gab dieses Thema zu bearbeiten. Er ermöglichte mir neben meiner Tätigkeit als Oberarzt in seiner Klinik die Freiräume, die zur Durchführung dieser Arbeit zwingend nötig waren. Ferner unterstützte er mich jederzeit mit seiner persönlichen Erfahrung und seinem fachlichen Wissen und trug damit wesentlich zu einem erfolgreichen Gelingen dieser Arbeit bei.

Mein ganz spezieller Dank geht an Herrn Dr. W. Schwarze, CEO der Fa.AST für die Anregungen zum Thema und die wissenschaftliche Beratung in der Studienplanung. Er hat durch die Zurverfügungstellung des Versuchslabors und des Lithospace® Lithotriptors die Arbeit erst ermöglicht. Ohne Ihn wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Besonders danken möchte ich auch allen Mitarbeitern der Firma AST, insbesondere den Herrn Oppermann, Heinze, Sourisoux und Coriand, die mir in vielfältiger Weise bei der Durchführung der Experimente hilfreich zur Seite standen.

Herrn Peter Nelles, gilt mein Dank für die kollegialen Diskussionen in allen Phasen dieser Arbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. G. Wassmer und Herrn Dr. rer. medic Jeremy Franklin aus dem Institut für Medizinische Statistik, Informatik und Epidemiologie der Universität zu Köln für die überaus freundliche Beratung bei der statistischen Bewertung der Ergebnisse bedanken.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, meiner Frau Christine und den Kindern Max, Sibylle und Katharina die mich immer unterstützt haben und mir die Zeit gaben diese Arbeit fertigzustellen.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Medizinstudium ermöglicht haben und mir immer mit Wort und Tat unterstützend zur Seite standen.

**Meiner Familie
in Dankbarkeit gewidmet**

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	9
1. EINLEITUNG	11
2. FRAGESTELLUNG	23
3. MATERIAL UND METHODEN	24
3.1. PRINZIPIEN DER ESWL BEHANDLUNG	24
3.2. MECHANISMEN DER STEINFRAGMENTATION.....	31
3.3. DER VERSUCHSAUFBAU	37
3.3.1. <i>Das verwendete Lithotripsiesystem:</i>	37
3.3.2. <i>Die Reflektoren</i>	43
3.3.2.1. <i>Der Brennlinsenreflektor</i>	46
3.3.2.2. <i>Der Halbellipsoidreflektor</i>	47
3.3.3. <i>Die verwendeten Teststeine</i>	49
UNTERSUCHTE PARAMETER.....	51
<i>Effektiver Abstand Reflektor / Stein</i>	51
3.4.2. <i>Koppelabstand (Abstand Reflektor / Wasserbad)</i>	53
3.4.3. <i>Kopffläche</i>	54
3.4.4. <i>Stoßwellenenergie / Generatorspannung (kV)</i>	55
3.5. GEOMETRISCHE REKONSTRUKTION.....	55
3.5.1. <i>Brennlinsenreflektor</i>	56
3.5.2. <i>Halbellipsoidreflektor</i>	58
3.6. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	60
3.7. STATISTIK	64
4. ERGEBNISSE	65
4.1.1 ERGEBNISSE MIT DEM BRENNLINIENREFLEKTOR (TABELLE)	67
4.1.2 GEOMETRISCH KORRIGIERTE ERGEBNISSE MIT DEM BRENNLINIENREFLEKTOR (TABELLE).....	68
4.2.1 ERGEBNISSE MIT DEM HALBELLIPSOIDREFLEKTOR (TABELLE)	69
4.2.2 GEOMETRISCH KORRIGIERTE ERGEBNISSE MIT DEM HALBELLIPSOIDREFLEKTOR (TABELLE)	70
4.3 GRAPHISCHE DARSTELLUNGEN.....	71
4.3.1 <i>Effektiver Abstand Reflektor – Stein</i>	72
4.3.2. <i>Koppelabstand (Abstand Reflektor – Wasserbad)</i>	75
4.3.3 <i>Kopffläche</i>	78
4.3.4 <i>Stoßwellenenergie / Generatorspannung kV</i>	82

4.3.5. <i>Blendeneffekt</i>	88
4.4. SPEZIELLE AUSWERTUNG - BRENNLINIENREFLEKTOR.....	96
4.4.1. <i>Blendeneffekt</i>	96
4.1.1.1. Einfluss der Korrektur der geometrischen Abschattung	102
4.4.2. <i>Effekt der Blendenstellung</i>	103
4.4.3. <i>Ergebnisübersicht Brennlinienreflektor</i>	104
4.5. SPEZIELLE AUSWERTUNG - HALBELLIPSOIDREFLEKTOR	106
4.5.1. <i>Blendeneffekt</i>	106
4.5.1.1. Einfluss der Korrektur der geometrischen Abschattung	111
4.5.2. <i>Effekt der Blendenstellung</i>	113
4.5.3. <i>Ergebnisübersicht Halbellipsoidreflektor</i>	115
4.6. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE:	116
4.6.1. <i>Zusammenhang mit Stoßwellenenergie:</i>	116
4.6.2. <i>Zusammenhang mit der Entfernung Stoßwellenkopf/ Stein:</i>	116
4.6.3. <i>Effektivität der Blendenstellung</i>	116
5. DISKUSSION	118
5.1. DATENBEWERTUNG.....	119
5.1.1. BETRACHTUNG DES DATENKOLLEKTIVS	119
5.1.1.1. PRÜFVORSCHRIFT DES HERSTELLERS	119
5.1.1.2. MEBWERTVERHALTEN „kV ERHÖHUNG“	120
5.1.2. FEHLERDISKUSSION.....	121
5.2. BLENDENEFFEKT	127
5.3. KLINISCHE ASPEKTE:	133
6. ZUSAMMENFASSUNG	137
7. LITERATURVERZEICHNIS	138
8. ANHANG	144
8.1 TABELLENVERZEICHNIS	144
8.2 ABBILDUNGSVERZEICHNIS	145
9. LEBENS LAUF	150

Abkürzungsverzeichnis

Aqua dest:	Aqua destillata
AST:	Advanced Shockwave Technology
AUA :	American Urological Association
AWMF :	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften
BMI:	Body Mass Index
C:	Celsius
CEO:	Chief Executive Officer
EAU :	European Association of Urology
Eff.:	Effektiv
ESWL:	Extrakorporale Stoßwellenlithotripsie
F:	Fokus
Hz:	Hertz
g:	Gramm
GPa:	giga Pascal
HM ₁ :	Human Modell 1
HM ₃ :	Human Modell 3
kg:	Kilogramm
kV:	kilo Volt
m:	Meter
mm ³ :	kubic Millimeter
MPa:	mega Pascal
N:	Newton
nF:	nano Farad
pHPT :	primären Hyperparathyreoidismus
pH:	pH – Wert, der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionen – Aktivität in einer wässrigen Lösung
PNL:	Perkutane Nephrolitholapaxie

s:	Sekunde
spp:	species pluralis
STW:	Stoßwellen
URS:	Ureterorenoskopie
USA:	United States of America
V:	Volt
€:	Euro
µS:	mikro Siemens
Ø:	Durchmesser

1. Einleitung

Das Harnsteinleiden nimmt in der westlichen Industriekultur zu, es gilt als eine Volkskrankheit. Die Prävalenz liegt im Jahr 2000 in Deutschland bei 4,7 %, die Inzidenz der Neuerkrankungen steigt nach einer Untersuchung von Hesse et al. von 0,54% im Jahr 1979 auf 1,47% (19). Eine gleichartige Zunahme kann auch in anderen westlichen Industriestaaten festgestellt werden. In den USA wird für den Zeitraum von 1988 bis 1994 eine Prävalenz von 5,2%, für den Zeitraum von 1976 bis 1980 eine Prävalenz von 3,8% nachgewiesen, dies entspricht einer Steigerung von 37% (69).

Viele Daten belegen den Zusammenhang mit Ernährung, Lebensstil, Klima, Umwelt, Heredität, Geschlecht, Alter und Ethnizität (11, 20, 35, 56, 58). Aber auch die in den letzten Jahren erfolgte weite Verbreitung der Ultraschalluntersuchung in der primärärztlichen Versorgung hat durch die Entdeckung vieler asymptomatischer Nierensteine einen Teil zur Erhöhung der Inzidenz beigetragen (34).

Schumann zeigt am Sektionsgut des Pathologischen Instituts Leipzig zwischen 1913 und 1958 starke Schwankungen in der Steinhäufigkeit (Abb.1), mit deutlicher Abnahme während der Kriegs – und der unmittelbaren Nachkriegsjahre (1914 – 1918 und 1939 – 1945) und dem Wiederanstieg parallel zur verbesserten Ernährungslage und der allgemeinen Prosperität in den Nachkriegsjahren (64). Einer der Faktoren, die als ursächlich diskutiert werden, ist die sich ändernde Ernährungssituation, die veränderte Aufnahme von Eiweiß.

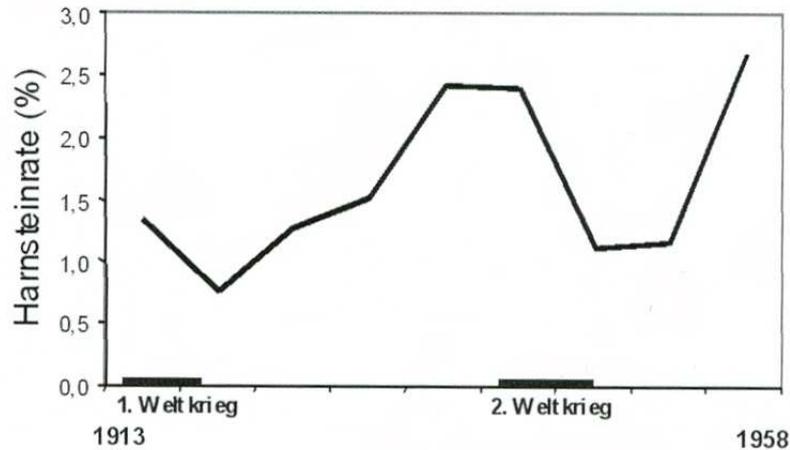


Abbildung 1: Verlauf der Häufigkeit von Steinen im Sektionsgut Leipzig (64)

Neuere Arbeiten zeigen die Korrelation von Steininzidenz und Prävalenz mit dem Körpergewicht und dem Body Mass Index (BMI). Dies kann sowohl bei Männern als auch bei Frauen nachgewiesen werden. Die Korrelation ist bei Frauen stärker ausgeprägt als bei Männern (11, 76). In Japan haben 1950 Blasensteine und Steine der oberen Harnwege die gleiche Prävalenz; bis 1980 steigt die Prävalenz der Steine der oberen Harnwege auf nahezu das doppelte an. Im gleichen Zeitraum steigt die tägliche Einnahme von tierischem Eiweiß von 20 auf 40 g (81). Die höhere Prävalenz der Urolithiasis in Saudi-Arabien (1990) gegenüber den USA und Europa wird ebenfalls dem höheren Konsum von tierischem Eiweiß zugeschrieben, 10% mehr tierisches Eiweiß als in den USA, 50% mehr als in Europa (55, 70).

Der Lebensstil und Beruf haben ebenfalls einen messbaren Effekt auf die Steinhäufigkeit. Joost und Marberger zeigen in einer epidemiologischen Untersuchung in Tirol („Götzenstudie“), dass Angestellte und Akademiker deutlich mehr Steine haben als Handarbeiter (32). Allgemein kann Stress das Risiko von Harnsteinen erhöhen, dies wird pathophysiologisch auf die von Adrenalin verursachte Vasokonstriktion im Vas afferens zurückgeführt (5, 47). Blacklock kann den Einfluss von Stress in seiner epidemiologischen Untersuchung der Prävalenz der Urolithiasis in der britischen Marine zeigen, vergleichbare Daten liegen für Piloten vor (6, 8). Die Untersuchung von Blacklock zeigt aber auch, dass Köche und Maschinenraumpersonal die höchste Steinbildungsrate haben. Die Ursache hierfür ist sicherlich in ihren Arbeitsbedingungen, i.e.S. der Temperatur ihrer Arbeitsstellen mit konsekutiv erhöhter Harnkonzentration zu suchen.

Das Geschlecht ist ebenfalls ein eindeutiger Risikofaktor für die Steinbildung, so findet sich eine Prävalenz von 5,5% für Männer und eine Prävalenz von 4 % für Frauen (19). Das geschlechtsspezifische Risiko zwischen Männern und Frauen gleicht sich nach US - amerikanischen Daten jedoch an. Stamatiou findet in der Zeit von 1976 -1980 ein Männer zu Frauen Verhältnis von 1,75 : 1 und in der Zeit von 1988 bis 1994 ein Verhältnis von 1,54 : 1 (69). Scales zeigt 2005 in der Auswertung von Versicherungsdaten, dass im Jahre 2002 gleichviele Männer wie Frauen aus stationärer Behandlung wegen einer Urolithiasis entlassen wurden (61).

Die Ethnizität spielt ebenfalls eine wichtige Rolle in der Prävalenz der Urolithiasis. So beschreibt Soucie (1994) unter männlichen US Amerikanern , dass Kaukasier die höchste Prävalenz haben, gefolgt von Lateinamerikanern, die eine Prävalenz von 70% der Kaukasier haben, Asiaten zeigen eine relative Prävalenz von 63% und Afroamerikanern nur 44% der kaukasischen Prävalenz (68). Die Geschlechtsverteilung variiert auch zwischen den Ethnizitäten, bei Kaukasier findet sich ein deutliches Übergewicht für Männer (19, 69), bei Afroamerikanern ein Übergewicht für Frauen. Sarmina (1987) zeigt ein Männer zu Frauen Verhältnis von 2,3, : 1 für Kaukasier und 0,65 : 1 für Afroamerikaner (60). In einer Gruppe von Patienten, die sich einer ESWL Therapie unterzogen haben, findet Michaels (1994) folgende Geschlechtsrelationen Männer zu Frauen (45):

bei Asiaten:	1,8 : 1
bei Weißen:	1,6 : 1
bei Lateinamerikanern	0,7: 1
bei Afroamerikanern	0,5 : 1.

Die Altersverteilung des Steinleidens zeigt bei Männern eine Häufung zwischen der vierten und sechsten Dekade, bei Frauen findet sich ein zweigipfliger Verlauf (dritte und sechste Dekade), die vierte und fünfte Dekade zeigen aber nur eine geringe Abflachung. Bei beiden Geschlechtern sind Steine vor dem 20. Lebensjahr eine Seltenheit, die Häufigkeit liegt unter 2% (31, 73).

Jahreszeitliche Klimaunterschiede sowie das Gesamtklima haben nachweisbare Effekte auf die Steinbildung. Diese Unterschiede führen zu einer Häufung von Steinen ca. zwei Monate nach dem jahreszeitlichen Temperaturhöchststand, Juli – September auf der Nordhalbkugel, Dezember bis März auf der Südhalbkugel (2, 53, 70). Hier wird der Einfluss einer verstärkten Vitamin D-Bildung durch das Sonnenlicht und eine Verminderung des Urinvolumens durch vermehrtes Schwitzen diskutiert (49, 54). In der Untersuchung von Soucie et al. wird die unterschiedliche Steinprävalenz (North Dakota, Washington State < Florida) mit der Höhe der Durchschnittstemperatur (5,2°C North Dakota / 22°C Florida) und dem Sonnenlichtindex (14,2 Washington State / 39,7 Florida) in Zusammenhang gebracht (67). Die während des Zweiten Weltkriegs und der Golfkriege durchgeführten Untersuchungen an Soldaten zeigen ebenfalls den Einfluss von Klimafaktoren i.e.S. Hitze, Sonnenlicht und Flüssigkeitsrestriktion. Pierce berichtet schon 1945 über eine Häufung von Steinkoliken bei Soldaten, die im Sommer in einer nicht näher genannten Wüstenregion Dienst taten (51). Anekdotisch wird gleiches in der Geschichte des Deutschen Afrika Korps „Paul Carrell: Die Wüstenfüchse“ berichtet. Evans zeigt, dass symptomatische Harnsteine bei bislang steinfreien Soldaten, die in der Golfregion Dienst taten, ca. 93 Tage nach Eintreffen in der Golf Region auftraten (14). Parry berichtet über die Calcium und Magnesium Spiegel im Urin bei britischen Soldaten, die aus dem gemäßigtem Klima Großbritanniens in die Golf Region verlegt wurden. Er maß die Werte vor Verlegung sowie zehn Tage nach Verlegung. Er zeigt, dass bei Soldaten, die während der „kalten Saison“ der Golf Region, verlegt wurden, die Urin Calcium Spiegel und das Magnesium / Calcium Verhältnis unverändert blieben. Bei Soldaten, die während der „heißen Saison“ in die Golf Region verlegt wurden, stieg die Calcium Urin Konzentration deutlich auf Werte an, wie sie bei Soldaten gefunden wurden, die schon 8 Monate im Land waren. Das Magnesium / Calcium Verhältnis fiel in Bereiche, die für Steinbildner typisch sind. Der Effekt wird auf die durch vermehrte Sonnenexposition induzierte Produktion von Vitamin D3 zurückgeführt.

Genetische Einflüsse auf die Steinbildung sind wahrscheinlich. Bei der Cystinurie, der Grundkrankheit von Cystinsteinbildnern, ist eine monogenetische Ursache gesichert. Es ist eine autosomal rezessive Erkrankung, bei ihr ist der Transport von dibasischen Aminosäuren (Cystin, Lysin, Arginin und Ornithin) im proximalen Tubulus und im Darm gestört (21). Die Cystinurie ist die zweithäufigste autosomal rezessive Erkrankung in Europa. Das betroffene Gen ist auf dem Chromosom 2p21 lokalisiert, der Genort SLC3a1, es sind zur Zeit 25 Mutationen des Gens beschrieben (38). Auf dem Chromosom 19q31.1 mit dem Genort SLC 7A9 ist eine inkomplette rezessive Form der Cystinurie lokalisiert.

Arginin hat eine Löslichkeit in Wasser von 150g/l bei 25°C (23) , Lysin und Ornithin sind ebenfalls im Urin wesentlich besser löslich als Cystin. Cystin hat eine Löslichkeit im Wasser von 190mg/l bei 20°C (24). Deshalb findet man nahezu keine Steine aus Arginin, Lysin oder Ornithin. Bei Cystin ist die Steinentstehung physikochemisch durch die Überschreitung der Lösungsfähigkeit des Urins für Cystin bei gestörter Rückresorption im proximalen Tubulus zu erklären.

Das Harnsteinleiden hat eine hohe Rezidivrate, jedoch unterscheidet sie sich deutlich je nach Steinzusammensetzung. In den ersten vier Jahren nach der ersten Steinepisode, ist das Rezidiv am häufigsten (1, 42, 75). Jedoch haben mehr als 50% aller Rezidivsteinbildner nur ein Rezidiv, nur 10% der Rezidivsteinbildner haben mehr als drei Rezidive (62, 71).

Eine Übersicht über Harnsteinarten, ihre Mineralnamen und deren chemische Zusammensetzung (Tab. 1):

Harnsteinart	Mineralname	Chemische Zusammensetzung
Oxalate	Whewellit	Calciumoxalat-Monohydrat
	Weddellit	Calciumoxalat-Dihydrat
Harnsäure und Urat	Uricid	Harnsäure
		Harnsäuredihydrat
		Monoammoniumurat
Phosphate	Struvit	Magnesiumammoniumphosphat
		Hexahydrat
	Dahllite	Carbonatapatit
	Brushit	Calciumhydrogenphosphat Dihydrat
	Apatit	Calciumphosphat
	Hydroxylapatit	Pentacalziumhydroxylphosphat
Whitlockit	β-Tricalciumphosphat	
Genetisch	Cystin	
Determinierte Steine	Xanthin	
	2,8-Dihydroxyadenin	
Iatrogene Steine	Indinavir	
	Sulfonamide	

Tabelle 1: Steinarten

Calciumhaltige Steine machen zwischen 70 und 90% aller Steine aus (15, 37, 62, 63). Für Weddellit, Whewellit, Karbonatapatit werden Rezidivraten zwischen 30 und 40% angegeben, für Brushit um 65% (62, 71).

Harnsäuresteine machen rund 5-15 % aller Steine aus, in speziellen Populationen können sie bis zu 75% aller Steine ausmachen (22, 26, 27, 39, 63, 74). Hier liegt die in der Literatur angegebene Rezidivrate um 20 % (48, 59, 62, 63, 74). Strohmeyer gibt eine deutlich höhere Rezidivhäufigkeit von über 50 bis 70% an (72).

Struvitsteine als typische Infektsteine haben bei unbehandelter Grunderkrankung mit bis zu 70% eine sehr hohe Rezidivrate, bei kompletter Steinsanierung und antibiotischer Behandlung sinkt die Rezidivquote drastisch ab (3, 29, 44).

Die Steinbildung ist ein sehr heterogener Vorgang, je nach Steinart lassen sich sehr verschiedene Mechanismen der Steinbildung beschreiben.

Für die häufigste Steinart, die Calciumoxalatsteine, sind mehrere Wege der Steinentstehung bekannt. Neben definierten Krankheitsbildern z.B. dem primären Hyperparathyreoidismus (pHPT), dem Malabsorptionssyndrom bei Colitis Ulcerosa und Ileitis terminalis oder einer renal tubulären Azidose, für die die Wege der Steinentstehung zum jetzigen Zeitpunkt als geklärt erscheinen, gibt es eine große Gruppe von sogenannten idiopathischen Calciumoxalatsteinbildnern, für die lange keine plausible Erklärung der Steinbildung existierte. Erst in den letzten Jahren ist der Weg der Steinentstehung, bei der die sogenannten Randall - Plaques möglicherweise eine entscheidende Rolle in der Steinbildung spielen, beschrieben worden. Der Ablauf der Steinbildung wird zur Zeit wie folgt gesehen: im Bereich der Basalmembran des dünnen Anteils der Henle Schleife kommt es zu einer Ablagerung von Calciumphosphatkristallen (79). Hierfür scheint eine Übersättigung des Urins mit Calcium mit einer Erhöhung der tubulären und interstitiellen Konzentration ursächlich zu sein. Verstärkend kann ein saurer Urin pH, der mit einer erhöhten Bicarbonataufnahme ins Nierenmark einhergeht, durch den dadurch erhöhten interstitiellen pH die Ablagerung von Calciumphosphat erleichtern. Störungen der Mikrozirkulation im Bereich der Vasa recta im inneren Nierenmark können durch den gestörten Abtransport von Calcium die Plaquebildung unterstützen. Lokale Ischämien können via entzündlicher Reaktionen zu Zellschädigungen und Calciumablagerungen führen. Hier scheint der Einfluss von Stressfaktoren auf die Steinbildung seinen Ansatzpunkt zu haben (6, 8, 47). Zusätzlich können durch negativ geladene Gruppen von intrazellulären Matrixmolekülen, z.B. das Glykosaminoglycan Hyaluron, die positive Calcium-Ionen binden,

die Plaquebildung verstärkt werden. Die Plaques liegen um die dünnen Anteile der Harnschleife und der Vasa recta und breiten sich bis suburothelial in die Papille aus. Sie können dort als Randall – Plaques bei endoskopischen Prozeduren gesehen werden (13). An der Verbindungsstelle zwischen Plaque und Stein ist das Urothel nicht mehr nachzuweisen, jedoch abwechselnde Lagen von Osteopontin und Tamm – Horsfall – Protein mit Calciumphosphat. Je weiter von der Anheftungstelle entfernt, desto geringer der Anteil von Calciumphosphat und desto höher der von Calciumoxalat, dem Material des manifesten Steins. Es wird davon ausgegangen, dass die Kristalle und die Matrixmoleküle aus dem Urin kommend sich am freiliegenden Plaque anlagern.

Bei der Bildung von Harnsäuresteinen hat der Urin pH eine entscheidende Rolle. Die Harnsäure kann im physiologischen Urin pH-Bereich von 5 -8 sowohl undissoziiert als auch dissoziiert vorliegen. Undissoziiert können 60 – 70 mg / l in Wasser (37°) gelöst werden, dissoziiert 1500 mg/l! Bei einem pH von 5 sind weniger als 20% dissoziiert, über einem pH über 7 sind über 95% dissoziiert. Daraus wird klar, dass bei einem dauerhaft um und unter 5,5 liegendem Harn-pH eine Harnsäuresteinbildung fast unvermeidlich ist. Solche pH-Verhältnisse, die sogenannte „Säurestarre“, sind durch eine verminderte Glutaminase-Aktivität des Tubulus bedingt. Hierbei wird im Tubulus vermindert Ammoniak gebildet, der sonst die sezernierten H⁺ Ionen puffert, folglich sinkt der pH Wert. Zusätzlich kann ein erhöhter endogener Harnsäureanstieg durch Leukämie, Polyzythämie, Zytostatika, Uricosurika, oder durch einen Enzymdefekt der Hypoxanthin – Guanin – Phosphoribosyl Transferase (bei komplettem Ausfall Lesch – Nyhan Syndrom) bedingt sein. Ein Harnsäureanstieg kann durch stark erhöhte Aufnahme von tierischem Eiweiß und Alkoholabusus verursacht werden.

Bei Cystinsteinen ist die Steinentstehung physikochemisch durch die Überschreitung der Löslichkeitsfähigkeit des Urins für Cystin zu erklären. Bei erhöhter Cystinkonzentration, größer 1250 µmol/l, in der Regel durch gestörte Rückresorption im proximalen Tubulus bedingt, kommt es zu Steinbildung (57).

Struvitsteine (Magnesiumammoniumphosphat Hexahydrat) und Dahllitesteine (Carbonatapatit) werden als Infektsteine bezeichnet. Gemeinsam ist, dass sie im Rahmen von Harnwegsinfekten mit Urease bildenden (Harnstoff spaltenden) Bakterien entstehen. Die wichtigsten uropathogenen Keime, die obligat Urease produzieren sind:

Proteus spp
Providencia rettgeri
Morganella morganii
Corynebacterium urealyticum
Ureaplasma urealyticum

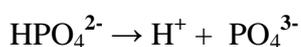
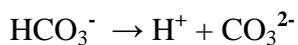
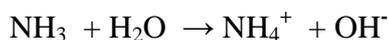
Keime , die Urease häufiger bilden können:

Enterobacter gergoviae
Klebsiella spp.
Providencia stuartii
Serratia marcescens
Staphylococcus spp.

Es gibt Stämme von häufigen uropathogenen Keimen, die in bis zu 5% der Fälle Urease bilden können:

Escherichia coli
Enterokokken
Pseudomonas aeruginosa(36)

Der Urinharnstoff wird durch die Urease gespalten. Der resultierende Urin pH liegt zwischen 7,2 und 8. Chemisch laufen folgende Reaktionen ab:



Bei Magnesium²⁺ und Ca²⁺ im Urin liefern die obigen Reaktionen die notwendigen Ionen zur Steinbildung für Struvit (MgHN₄PO₄), Hydroxylapatit (Ca₅(PO₄)₃OH) und Dahllite (Carbonatapatit = Ca₅(PO₄)₃CO₃).

Das Spektrum der Steintherapie umfasst konservative und interventionelle Ansätze. Die konservativen Ansätze beinhalten die abwartende Beobachtung und Begleitung eines Steinabgangs (kontrollierend / medikamentös unterstützend), sowie die Lysetherapie bei Harnsäuresteinen. Die interventionellen Ansätze umfassen die klassische offene Operation, heute auch laparoskopisch, die perkutane Nephrolitholapaxie (PNL), die Ureterorenoskopie (URS) sowie die extrakorporale Stoßwellenlithotripsie (ESWL). Welches Verfahren zur Anwendung kommt, hängt von mehreren Faktoren ab. Neben der Steinlage (Niere [Obere / Untere Kelchgruppe, Nierenbecken, Divertikel], Harnleiter [Oberer / Unterer]), Steingröße, Steinmaterial, Anatomie des Harntrakts, Vorbehandlung, Infektionen und Nierenfunktion müssen auch die Begleiterkrankungen und Medikation des Patienten in die Entscheidung einbezogen werden. Hinweise auf die Verfahrenswahl geben die Leitlinien der verschiedenen Fachgesellschaften AUA (American Urological Association) / EAU (European Association of Urology) / AWMF (Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften). Die aktuellste Leitlinie (Stand Nov 2012) wurde am 16.02.2009 von der AWMF veröffentlicht, es ist die S2 Leitlinie des Arbeitskreises „Harnsteine“ (36) der Akademie der Deutschen Urologen und des Arbeitskreises „Endourologie und Steinerkrankung“ der Österreichischen Gesellschaft für Urologie. Die folgende Tabelle gibt eine knappe Übersicht über die aktuellen Therapieempfehlungen der aktuellen AWMF Leitlinie (Tab. 2).

Organ	Lokalisation	Größe	Empfehlung
Niere	Ausgußstein	Geringe Steinmasse, Keine Dilatation	1. PNL 2. ESWL + Ureterschiene
		Große Steinmasse in mehreren Kelchen	1. PNL 2. Offene Operation
	Nierenbecken Obere / Mittlere Kelchgruppe	> 2 cm	1.PNL 2.ESWL +/- Ureterschiene
		1 – 2 cm	1. ESWL 2. PNL
		< 1 cm	1. ESWL 2. flex. URS
		Untere Kelchgruppe	> 2 cm
		1 – 2 cm	ESWL oder PNL
		< 1 cm	1.ESWL 2. flex. URS
Harnleiter	Oberer Harnleiter	> 1 cm	ESWL oder URS
		< 1 cm	1.ESWL 2. URS
	Unterer Harnleiter	>1 cm	ESWL oder URS
		<1 cm	1.URS 2. ESWL

Tabelle 2: Therapieempfehlung Leitlinie 2009

Für Harnsäuresteine, die per se einer konservativer Therapie, der oralen Litholyse, zugänglich sind, gelten die obigen Aussagen nicht.

Wenn man sich die Therapieempfehlungen rein numerisch ansieht, so ist unter den 24 Nennungen die ESWL 7 x als erste Wahl , 4 x als Alternative (gesamt 11 x), die URS je 3 x (gesamt 6 x), die PNL 5 resp. 1 x (gesamt 6 x) und die Operation 1 x genannt.

Die größten ausgewerteten Kohorten von Steinbehandlungen beschreibt M. Pearle mit dem „Urologic Diseases of America Project“ 2005 im Journal of Urology (50).

In den Jahren 1992 bis 2000 liegt die Häufigkeit der ESWL zwischen 49% – 54%, die der URS zwischen 40% und 42%, und der PNL zwischen 3% und 6% der durchgeführten Prozeduren.

Die Häufigkeit der offenen Operation sinkt von 4,3% auf < 1%.

Der Finanzbedarf zur Therapie der Urolithiasis in den USA liegt nach Pearle im Jahre 2000 bei 2,1 Milliarden Dollar (50).

Die häufigste Therapie ist die Extrakorporale Stoßwellenlithotripsie (ESWL). Sie wird mit der ersten Behandlung am Menschen am 26. Februar 1980 eingeführt (7). Das aus dem Versuchsgerät HM₁ (Human Modell ₁) entwickelte Seriengerät HM₃ (Fa Dornier Medizintechnik, Germering) wird bis 1987 gebaut. Das Gerät entwickelt sich zum Goldstandard der ESWL Behandlung (77). Seit 2003 wird zunehmend in der Literatur berichtet, dass die Ergebnisse der ESWL Behandlung durch die folgenden Gerätegenerationen nicht besser geworden sind, ja dass sogar Hinweise darauf vorliegen, dass die Behandlung risikoreicher geworden sei (33, 41, 50). Bezeichnenderweise erscheint noch im Jahre 2006, 19 Jahre nach Produktionseinstellung des HM₃, eine Arbeit im Journal of Urology, in der postuliert wird, dass die Therapie von großen Harnleitersteinen „first –line“ auf einem HM₃ – Lithotriptor erfolgen sollte (17).

2007 wird durch die Fa. Advanced Shockwave Technology (AST) Jena ein neuartiges Stoßwellen System (Lithospace[®]) auf den Markt gebracht, dessen Stoßwellenerzeuger mit dem bisherigen Credo: „Fokussierung der Energie auf einen Punkt“ bricht und die Stoßwellenenergie auf einer Brennlinie verteilt und so ein breites und langes Fokalfeld erzeugt. Die in-vitro-Ergebnisse lassen eine Effektivität im HM₃ Bereich erwarten. Erste Behandlungen am Menschen zeigen unterschiedliche Ergebnisse. Eigene Beobachtungen bei diesen klinischen Anwendungen deuten auf einen Zusammenhang der unterschiedlichen Behandlungsergebnisse zwischen Koppelfläche und Desintegrationsergebnis hin. Daraus entsteht die Fragestellung der vorliegenden Arbeit.

2. Fragestellung

In der Behandlung von Harnsteinen mit extrakorporalen Stoßwellen wird durch alle bisher erhältlichen Lithotriptoren die Energie auf ein Fokalareal fokussiert, mit dem Lithospace[®] - Lithotriptor ist dieses Prinzip zum ersten Mal verlassen worden.

Erste klinische Anwendungen am Menschen deuten auf einen Zusammenhang zwischen Koppelsituation / Koppelfläche und Desintegrationsleistung an. Dieser Zusammenhang soll in der vorliegenden Arbeit beleuchtet werden.

Folgende Fragestellungen sollen im Rahmen der vorliegenden experimentellen in vitro Studie beantwortet werden.

Kann eine ringförmige schallweiche Blende (Luft), wie sie durch Ankopplung des Behandlungskopfes eines Lithotriptors entsteht, auch wenn sie außerhalb / knapp innerhalb des geometrischen Schallgangs liegt, einen deutlichen Einfluss auf die Zertrümmerungsleistung haben?

Lässt sich dieser Effekt sowohl bei Fokussierung der Stoßwellenenergie auf einer Brennlinie (Brennlinienreflektor, Lithospace[®] – Lithotriptor) als auch bei Fokussierung der Stoßwellen auf ein punktförmiges Fokalareal (Halbellipsoid Reflektor, HM₃ - Typ) nachweisen?

Können aus den Ergebnissen Hinweise für die klinische Anwendung der Stoßwellenlithotripsie gewonnen werden?

3. Material und Methoden

3.1. Prinzipien der ESWL Behandlung

Die erste Stoßwellenbehandlung findet am 26. 02. 1980 an der Ludwig-Maximilians-Universität München auf dem ersten Versuchsgerät HM₁ (Human Model 1) der Firma Dornier Medizintechnik statt. Daraus wird das Seriengerät HM₃ (Human Model 3) entwickelt, das bis 1987 gebaut wird. Die Stoßwellenlithotripsie beruht auf dem Prinzip, dass Energie, die im ersten Fokus eines Halbellipsoids erzeugt wird, durch die Geometrie des Halbellipsoids in den zweiten Brennpunkt der Ellipse fokussiert wird (Abb. 2). Das Prinzip der Fokussierung der Stoßwellenenergie ist, auch wenn die Technik der Fokussierung je nach Stoßwellenquelle variiert, bis auf eine Ausnahme, auch heute noch für die ESWL typisch.

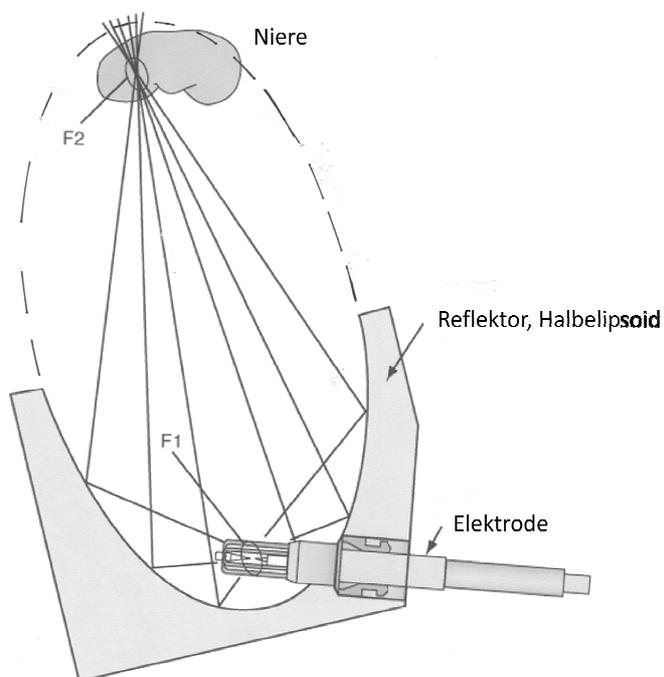


Abbildung 2: Prinzip der Fokussierung bei elektrohydraulischen Stoßwellenquellen (mod. nach Campbell-Walsh Urology (78))

Die Stoßwellen werden durch eine Unterwasserfunkenentladung, vergleichbar einer Zündkerze, erzeugt. Die Energie, typischerweise 16 - 30 kV Ladespannung an Kondensatorbänken mit 10 bis 100 nF Kapazität werden kurzgeschlossen, der dadurch entstehende Funkenüberschlag erzeugt eine Plasmablase, welche das Wasser plötzlich verdrängt und so die Stoßwelle erzeugt. Die Stoßwellenausbreitung benötigt zur definierten Ausbreitung entgastes Wasser definierter Leitfähigkeit (300-500µS [Mikro Siemens]). Die Aufgabe des behandelnden Arztes besteht darin, den zu zertrümmernden Nierenstein in den zweiten Fokus zu positionieren. Die Ortung erfolgt bei dem HM₃ - System durch zwei, schräg rechts und links von der Stoßwellenquelle angebrachten Röntgensystemen (Abb.3).

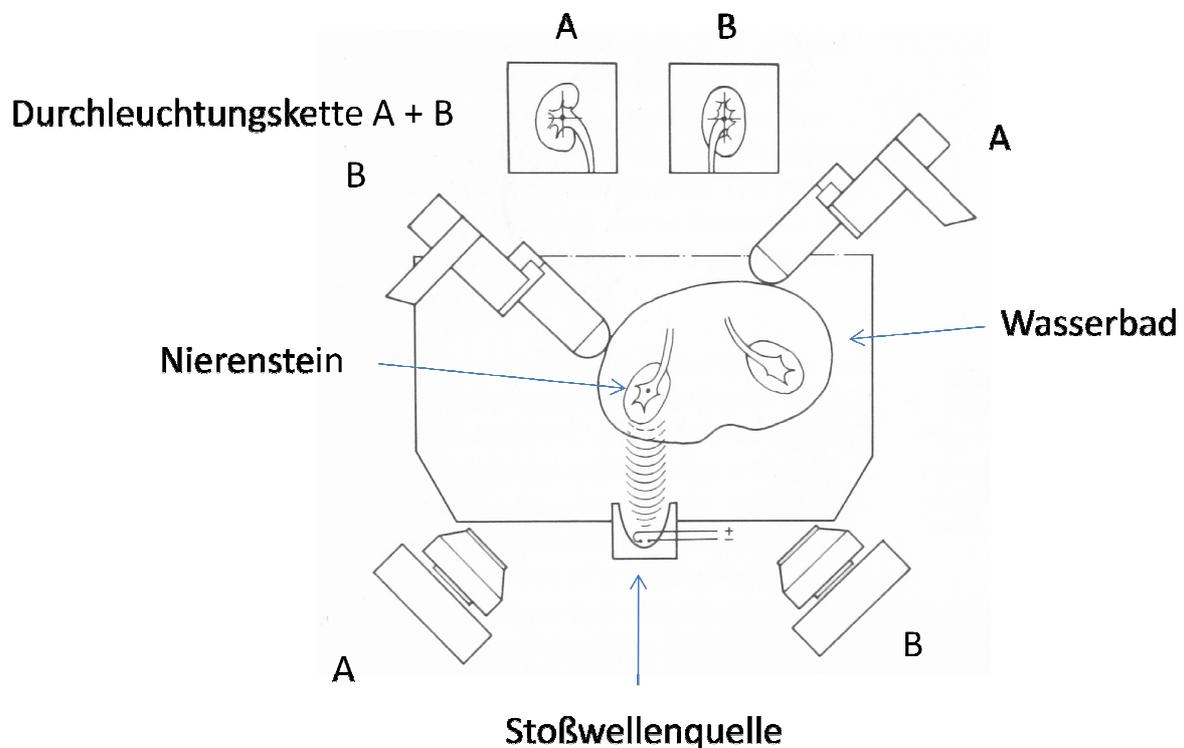


Abbildung 3: Ortungsprinzip HM₃ (mod nach Jenkins (30))

Der Patient wird auf einem Lagerungsgestell dreidimensional- hydraulisch in einem Wasserbad verfahren (Abb.4). Da der Patient sich in der ebenso wie der Halbellipsoid im selben Wasserbad befindet, ist die Ankopplung der Stoßwellenenergie ohne Verlust möglich. Mit den ersten Schüssen werden die kleinen Luftblasen an der Körperbehaarung aus dem Eintrittsfokus der Stoßwelle abgelöst und steigen von selbst an die Oberfläche.



Abbildung 4: HM₃ - Lithotriptor (Fa. Dornier Medizintechnik, Germering)

Der Platzbedarf des HM₃ Lithotripsiesystems ist sehr hoch, dies führt auf Grund der starken Nachfrage nach Lithotripsiesystemen zur Konkurrenzentwicklungen der Industrie, die aus patentrechtlichen Gründen auch alternative Energiequellen entwickeln. Im Laufe der Zeit werden als Zweitgenerationslithotriptoren Geräte eingeführt, bei denen auf das Wasserbad verzichtet werden kann und die Energieerzeugung nicht mehr über eine Funkenentladung in einem Halbellipsoid stattfindet.

Letztendlich werden zwei weitere Grundtypen von Energiequellen eingeführt, zum einen elektromagnetische, zum anderen piezoelektrische.

Bei den elektromagnetischen Energiequellen werden durch elektrische Ströme erzeugte Magnetfelder benutzt, um mittels Membranen eine Druckwelle zu erzeugen (Abb. 5). Die Stoßwelle wird durch eine akustische Linse fokussiert und über einen Koppelbalg in den Körper des Patienten eingeleitet.

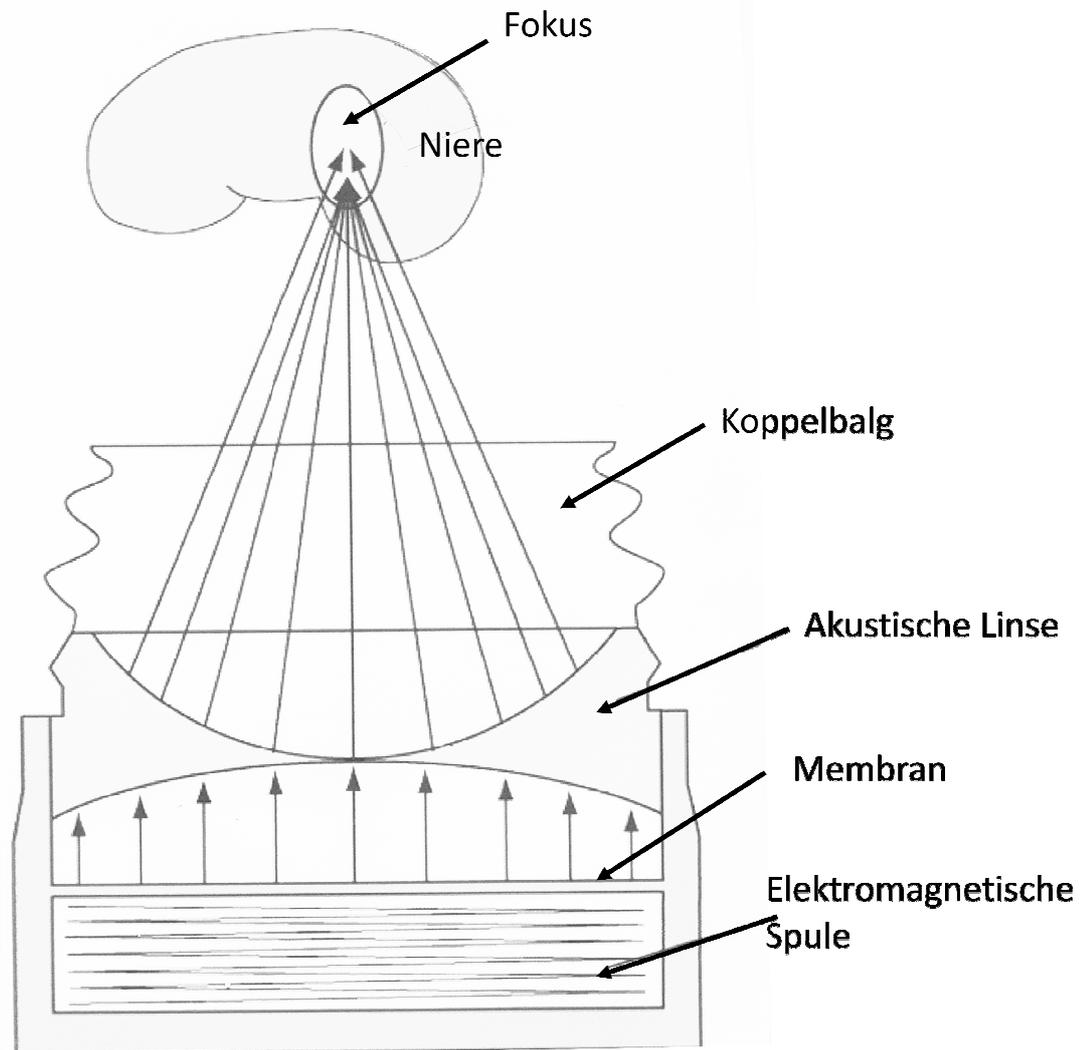


Abbildung 5: Prinzip der Fokussierung bei elektromagnetischen Stoßwellenquellen (mod. nach Campbell-Walsh Urology (78))

Ein weiteres verwendetes Prinzip besteht darin, dass piezoelektrische Kristalle auf einer Kugelkalotte montiert werden, die auf einem gemeinsamen Fokuspunkt ausgerichtet sind. Im Schnittbild (Abb. 6) stellt sich diese Form als Halbkreis dar.

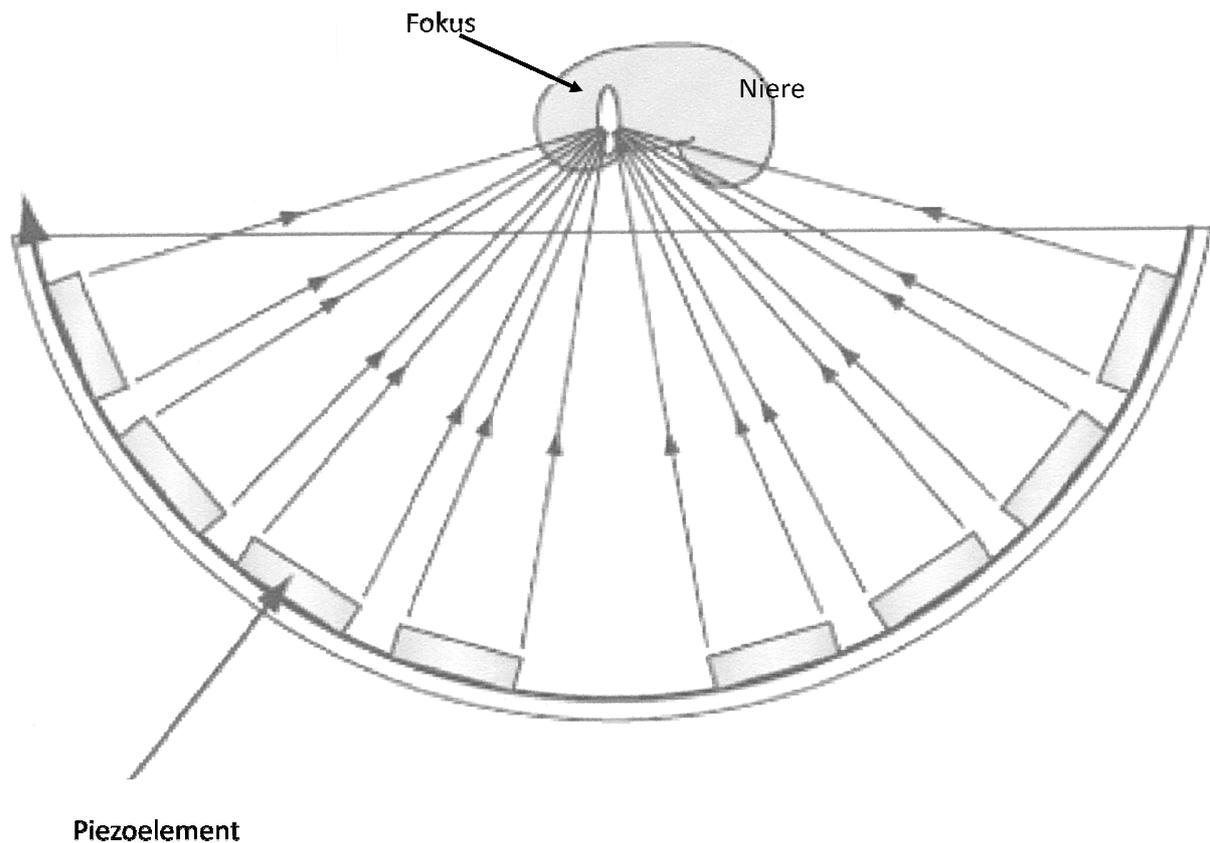


Abbildung 6: Prinzip der Fokussierung bei piezoelektrischen Stoßwellenquellen (mod. nach Campbell-Walsh Urology (78))

All diesen Systemen ist gemeinsam, dass sie die Energie auf einen geometrischen Punkt (Fokus / Fokalgebiet) hin fokussieren, in den der zu zertrümmernde Stein gebracht werden muss. Um die Zertrümmerungsleistung zu erhöhen, wird versucht die Fokalgebiete zu verkleinern und die Spitzendrücke in den Fokusgebieten zu erhöhen (Tab. 3).

Lithotriptor	Maximal Druck MPa	Fokalvolumen mm ³
Dornier HM ₃	36	20250
Medstone STS	48	8450
Dornier Compact Delta	55	1259
Siemens Multiline	80	960
Storz Modulith SLX	105	720
Wolf Piezolith	132	144
Siemens Modularis	57	10868
AST Lithospace	37	35000

Tabelle 3: Druck / Fokalvolumen einiger Lithotriptoren (mod. nach Campbell-Walsh Urology (78), Schwarze (65))

Jedoch zeigt sich, dass die erzielten Fragmentationsergebnisse nicht an die Ergebnisse des HM₃-Lithotriptors heranreichten (33, 41, 50, 77). Diese Geräte haben jedoch einen deutlich geringeren Platzbedarf, der vor allen Dingen durch den Verzicht auf das Wasserbad und die aufwendige Lagerungsmechanik, sowie durch die Verkleinerung der Ortungseinrichtungen bedingt ist.

Für die Durchführung der Stoßwellenbehandlung ergibt sich aus der gemeinschaftlichen Eigenschaft aller bisher vorgestellten Energiequellen, dass sie die Energie auf einen festen Fokus fokussieren, dass die Unterschiede in der Steinlage (Tiefe des Steins, Abstand von der Haut), durch einen unterschiedlichen Abstand zwischen Oberkante Energiequelle und Haut ausgeglichen werden müssen. Beim HM₃ wird dies durch die Bewegung des Patienten im Wasserbad gelöst, ohne die Qualität der Ankopplung zu verschlechtern. Bei den ersten piezoelektrischen Geräten wird der Patient in ein verkleinertes Wasserbad, eine Folienschüssel, gelegt; bei den elektromagnetischen Stoßwellenquellen wird dies dadurch gelöst, dass ein Koppelbalg über die Stoßwellenquelle fixiert wird, der den Abstand zur Körperoberfläche ausgleichen kann (Abb.7). Die Ankoppelung über einen elastischen Balg wird heute von allen aktuell produzierten Lithotriptoren benutzt.



Abbildung 7: Koppelbalg Lithospace vollausgefahren / halbausgefahren / leer

Das Paradigma der Fokussierung der Stoßwellen auf einen Fokuspunkt, ein kleines Fokal Areal ist erst in den letzten Jahren aufgeweicht worden, als von Seiten der Industrie im Rahmen der Weiterentwicklung der Stoßwellensysteme versucht wurde, Geräte mit HM_3 ähnlich breiten Fokalarealen zu entwickeln, z.B. Siemens Modularis / Lithoskop, Storz Modulith SLX -F₂. Im Jahre 2007 wird durch die Firma Advanced Shockwave Technology (AST Jena) ein Stoßwellensystem (Lithospace[®]) auf den Markt gebracht, bei dem die Stoßwellenenergie nicht auf einen Brennpunkt fokussiert, sondern auf eine Brennlinie verteilt wird und so ein langes und breites Fokalfeld erzeugt wird.

3.2. Mechanismen der Steinfragmentation

Die Extrakorporale Stoßwellenbehandlung von Harnsteinen kann mit Fug und Recht als ein technologischer Spin-off der Forschungen bezeichnet werden, die im Rahmen der Untersuchungen zur Allwettertauglichkeit des Lockheed F-104 Starfighter durchgeführt wurden. Bei Überschallflügen dieses Flugzeuges ist es beim Auftreffen von Regentropfen auf die Vorderkanten der Tragflügel nicht nur zu deutlichen Materialerosionen, sondern auch zu Veränderungen des umgebenden Materials gekommen. Als Ursache ist die Stoßwelle ausgemacht worden, die beim Auftreffen des Wassertropfens auf das Metall entsteht. Um diesen Effekt zu untersuchen, wird ein Stoßwellengenerator entwickelt, der dann in die Therapie der Nierensteine Einzug hält (25). Ursprünglich wird in der frühen Tierversuchsphase versucht, den Stein mit einer einzelnen Stoßwelle zu fragmentieren (65). Vor diesem Hintergrund ist verständlich, dass die Erklärungsansätze der Steinfragmentation deutliche Analogien zu den Mechanismen der Materialveränderungen an den Flugzeugflügeln aufweisen. Hier werden in den ersten Jahren nach klinischer Einführung drei Mechanismen besonders hervorgehoben:

1. Die Druckinhomogenität, die bei scharfer Fokussierung der Druckwelle am Stein entsteht und über Scherspannungen trichterförmige Erosionen am Stein hervorruft (Abb.8).

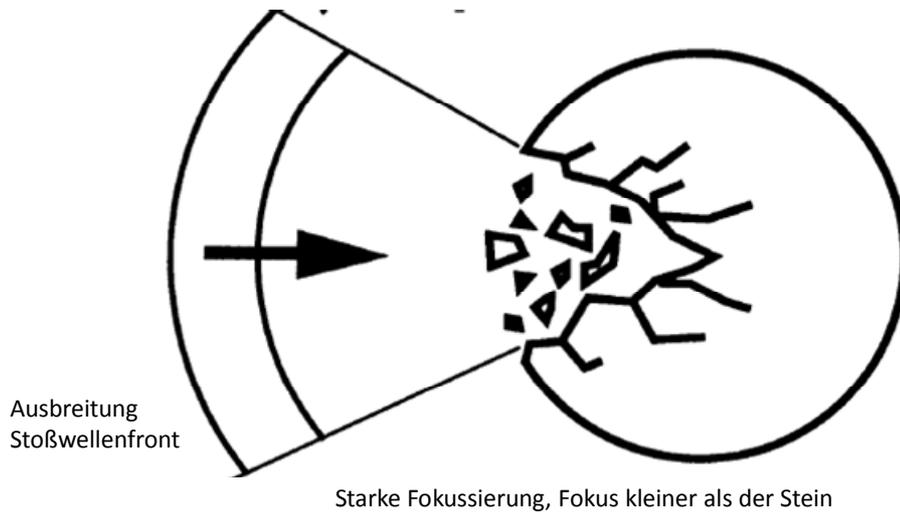


Abbildung 8: Steinfragmentation durch Druckinhomogenitäten (mod. nach Eisenmenger (12))

2. Die Druck und Zugspannungen, die durch die schallweiche Reflektion der Druckwelle an der Grenze Stein / Wasser (also der Austrittsseite der Druckwelle aus dem Stein) entstehen und zum Abplatzen von Steinmaterial an der dem Lithotripter abgewandten Seite führen (Hopkinson Effekt). Dies kann im Endeffekt zu Ermüdungsbrüchen, durch das Zusammenwachsen von Mikrorissen, führen (Abb.9).

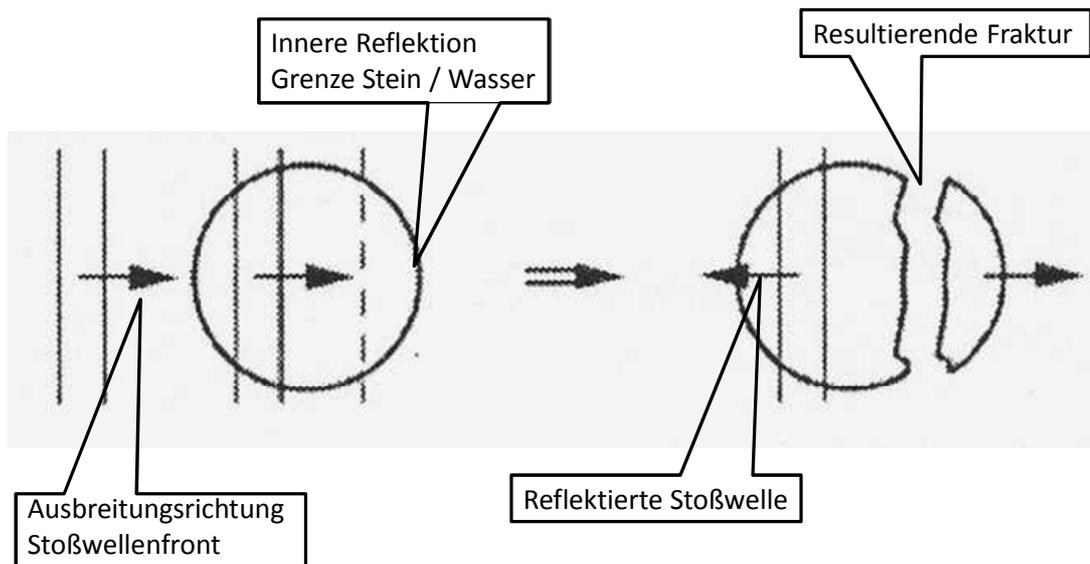


Abbildung 9: Steinfragmentation durch Innere Reflexion, Hopkinson – Effekt
(mod. nach Eisenmenger (12))

3. Die Steinerosion durch die Kavitationseffekte (Abb.10). Der negative Anteil der Druckwelle (auch Zugwelle genannt, bis -10 MPa) kann an Inhomogenitäten in der Flüssigkeit dazu führen, dass der Druck an dieser Stelle geringer als der Verdampfungsdruck der Flüssigkeit. Es entsteht eine kugelige Dampfblase, die binnen kurzer Zeit (ca. 200µsec) zusammenfällt und ihre Energie als neue Stoßwelle abgibt. Tritt dieser Effekt an einer Steinoberfläche auf, fällt diese Blase (1 µm bis 1mm) unter

Ausbildung eines Kavitationsmikrojets zusammen. Dieser Jet ist ein Wasserstrahl, der einen großen Teil der kinetischen Energie des Blasenzusammenfalls aufnehmen kann und damit Geschwindigkeiten zwischen 22 – 800 m/ sec erreichen kann. Er dauert nur wenige μsec , er ruft lokal eine zusätzliche Druckbelastung am Stein hervor (9, 10, 82, 83).

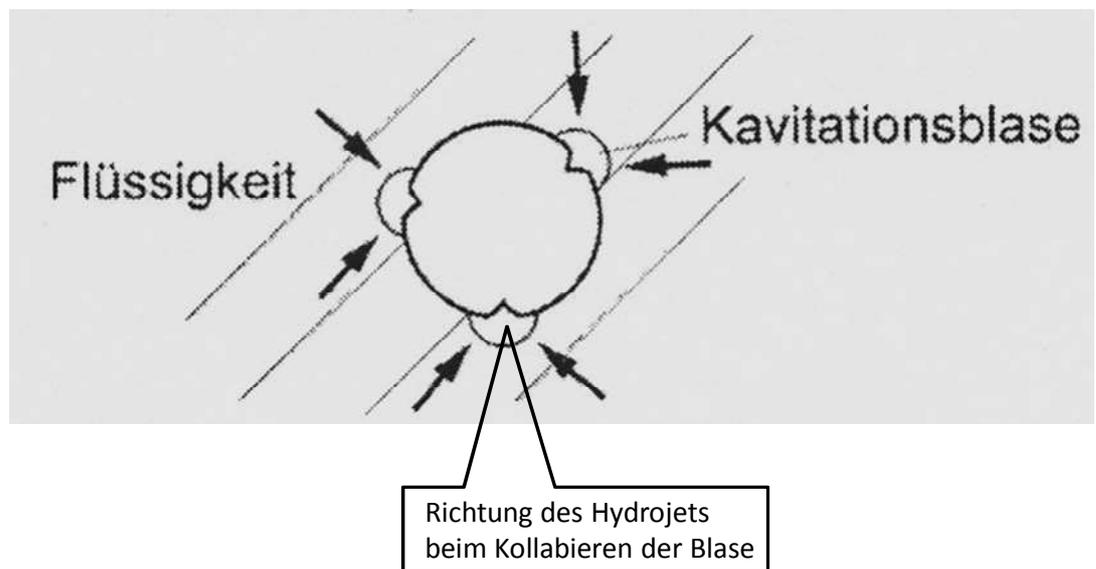


Abbildung 10:Steinfragmentation durch Kavitationseffekte (mod. nach Eisenmenger (12))

In den letzten Jahren findet ein weiterer Effekt verstärkt Beachtung. Dieser Mechanismus wird von Eisenmenger als binäre Fragmentation beschrieben und experimentell untersucht (12). Wenn eine Stoßwellenfront auf einen Stein trifft, dessen Durchmesser kleiner als die Stoßwellenfront ist, kommt es durch die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit im Stein und der umgebenden Flüssigkeit (Stein \gg Wasser) zu einem Quetscheffekt auf den Stein, der durch die innere Reflektion der Stoßwellen an der Grenze Stein / Wasser durch die dadurch entstehenden inhomogene Dehnungen und Zugspannungen verstärkt wird (Abb.11).

Eisenmenger kann experimentell zeigen, dass dieser Effekt mit zunehmendem Steinradius einen immer größeren Effekt hat (Daten von Modellsteinen mit 2,5; 6 und 7,5 mm Radius). Darauf fußend werden von der Industrie Lithotriptoren entwickelt, deren Fokalvolumina deutlich größer sind als die Fokalvolumina früherer Gerätegenerationen (siehe Tabelle 3).

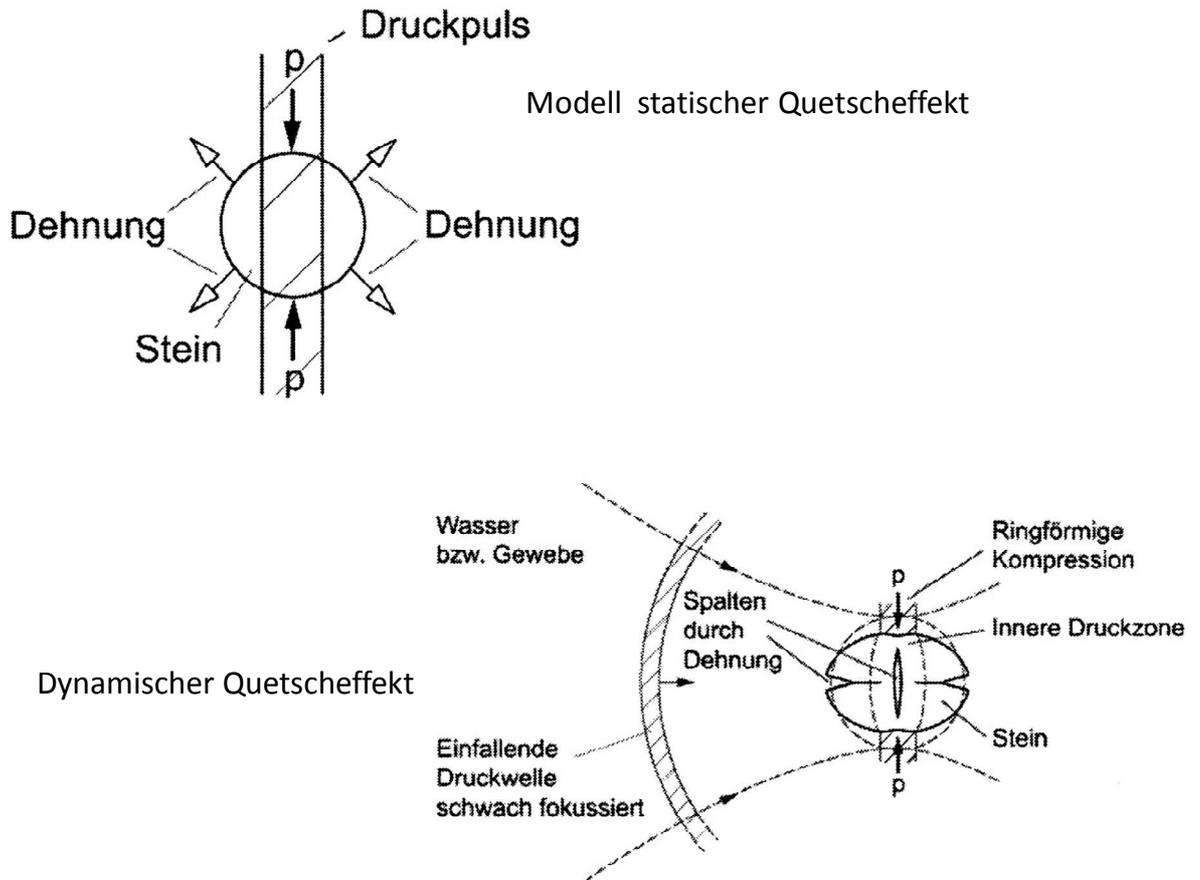


Abbildung 11: Steinfragmentation durch Quetscheffekt (mod. nach Eisenmenger (12))

Ein zusammenfassendes Modell der Mechanismen der Steinfragmentation (Abb.12) wird 2000 von M. Lokhandwalla und B. Sturtevant vorgeschlagen(43).

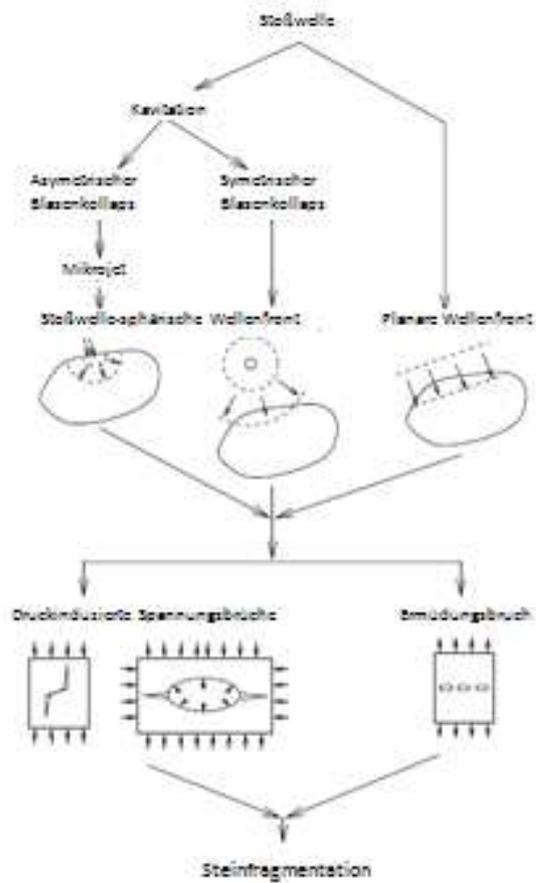


Abbildung 12: Modell Steinfragmentation (nach Lokhandwalla und Sturtevant (43))

Jedoch sind diese Erklärungsansätze und die zugrundeliegenden Modelle durch ihre geometrischen Vereinfachungen (Modellsteine homogen, Form: sphärisch, zylindrisch) nur im begrenzten Maße auf die reale Steinfragmentation anwendbar. Welcher Mechanismus, in welchem Maß, zur Fragmentation bei den unregelmäßig geformten, häufig materialinhomogenen Steinen beiträgt, ist weitgehend unklar.

3.3. Der Versuchsaufbau

3.3.1. Das verwendete Lithotripsiesystem:

Die Firma AST Jena stellt ein Lithotripsiesystem Typ Lithospace[®] zur Verfügung, um die Versuche durchzuführen (Abb. 14). Das Lithotripsiesystem verwendet eine elektrohydraulische Stoßwellenquelle. Der Stoßwellengenerator hat eine Kondensatorkapazität von 40 nF, die Ladespannung, die abgegebene Energie kann von 16 bis 26 kV verändert werden. Es werden Standard Elektroden Typ Dornier mit 0,5 mm Elektrodenabstand verwendet, die eine typische Lebensdauer von 3000 Stoßwellen besitzen (Abb.13).

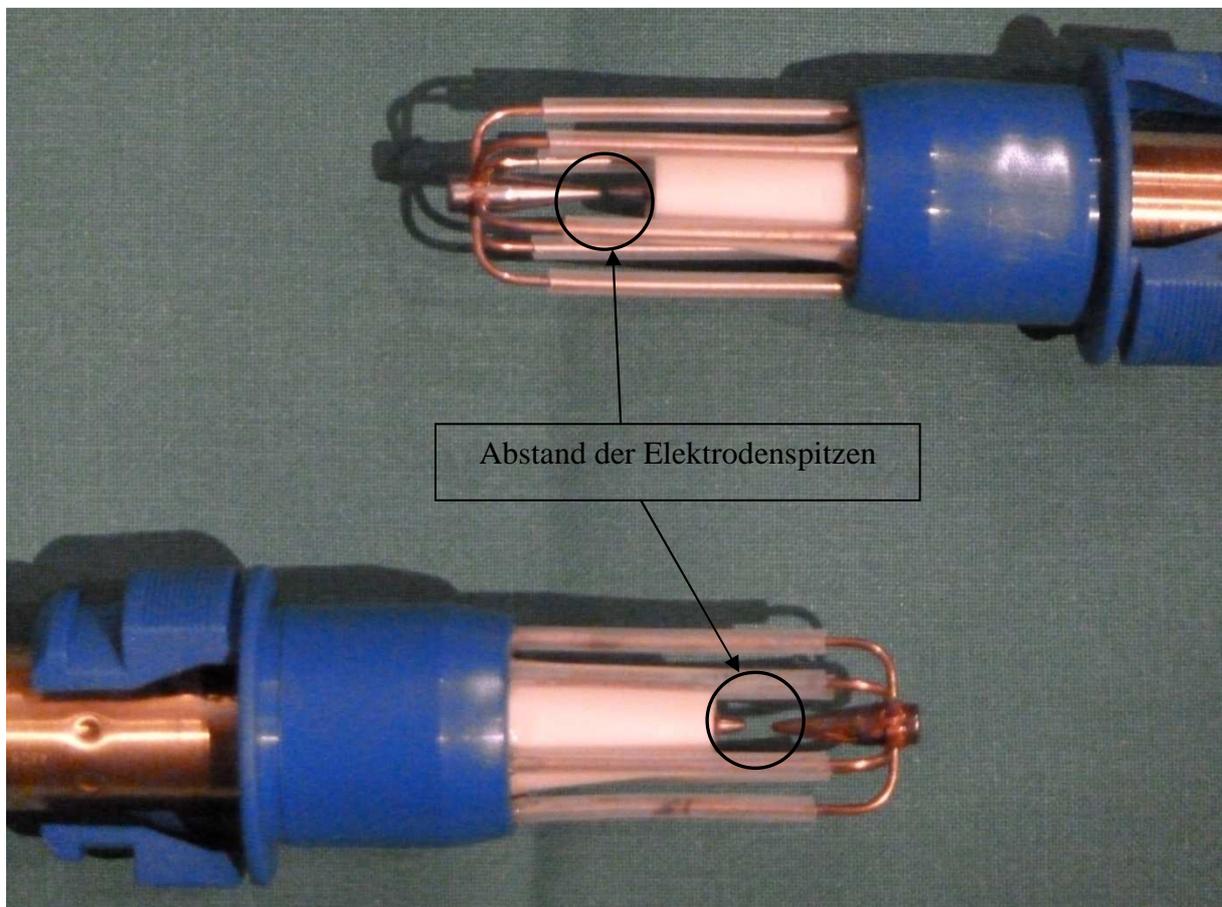


Abbildung 13: Oben : Elektrode neu, unten nach 3000 STW

Eine Elektrode zeigt während der ersten 600 STW einen deutlichen Elektrodenabbrand, der dazu führt, dass es aufgrund des größer werdenden Abstands zwischen Anode und Kathode zu Fehlzündungen mit ineffektiver Stoßwelle kommen kann, danach ist dieser Effekt deutlich geringer ausgeprägt(46) .

Klinisch wird dies durch Erhöhung der verwendeten Spannung ausgeglichen, wobei die Spitzendrücke im Fokalbereich nur gering ansteigen, das Fokalvolumen jedoch deutlich zunimmt (46).

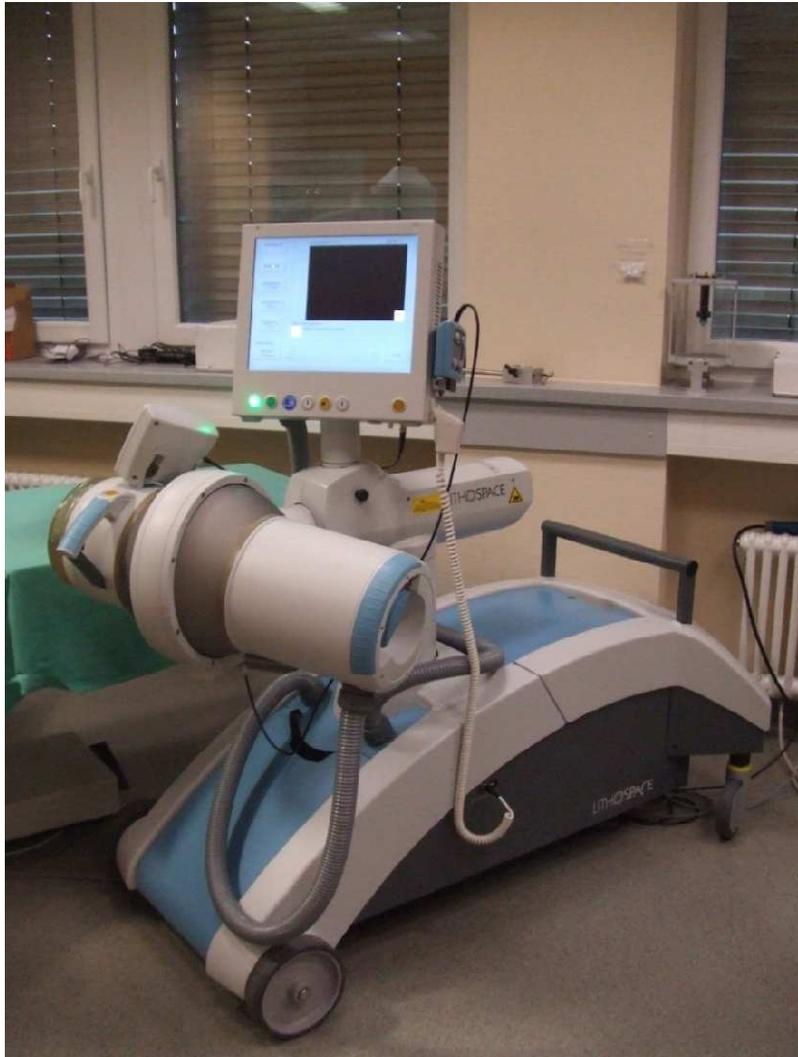


Abbildung 14: Klinisch genutzter Lithospace® Lithotriptor

Das Gerät ist dahingehend modifiziert, dass die Ringabdeckung am Therapiekopf entfernt und dort ein modifizierter Performancetopf mit vier Gewindestangen montiert ist (Abb.15). Der Performancetopf lässt sich stufenlos zwischen 3,5 cm und 12 cm verstellen. Die Versuche werden bei einem Abstand Oberkante Reflektor zur Membran Testbehälter von 40 mm und 80 mm durchgeführt (Abb. 17).



Abbildung 15: Modifizierter Performancetopf / Testtopf auf dem Stoßwellenkopf

Der modifizierte zylinderförmige Testtopf hat eine Höhe von 320 mm mit einer seitlichen Wandstärke von 4 mm Acrylglas, der Durchmesser beträgt außen 180 mm. Die Dicke der Membran an der Einkopffläche beträgt 0,5 mm. Die Membran hat einen Durchmesser von 172 mm. Auf der Membran sind Markierungen angebracht, mit deren Hilfe die Kopffläche eingestellt werden kann (Abb.16).

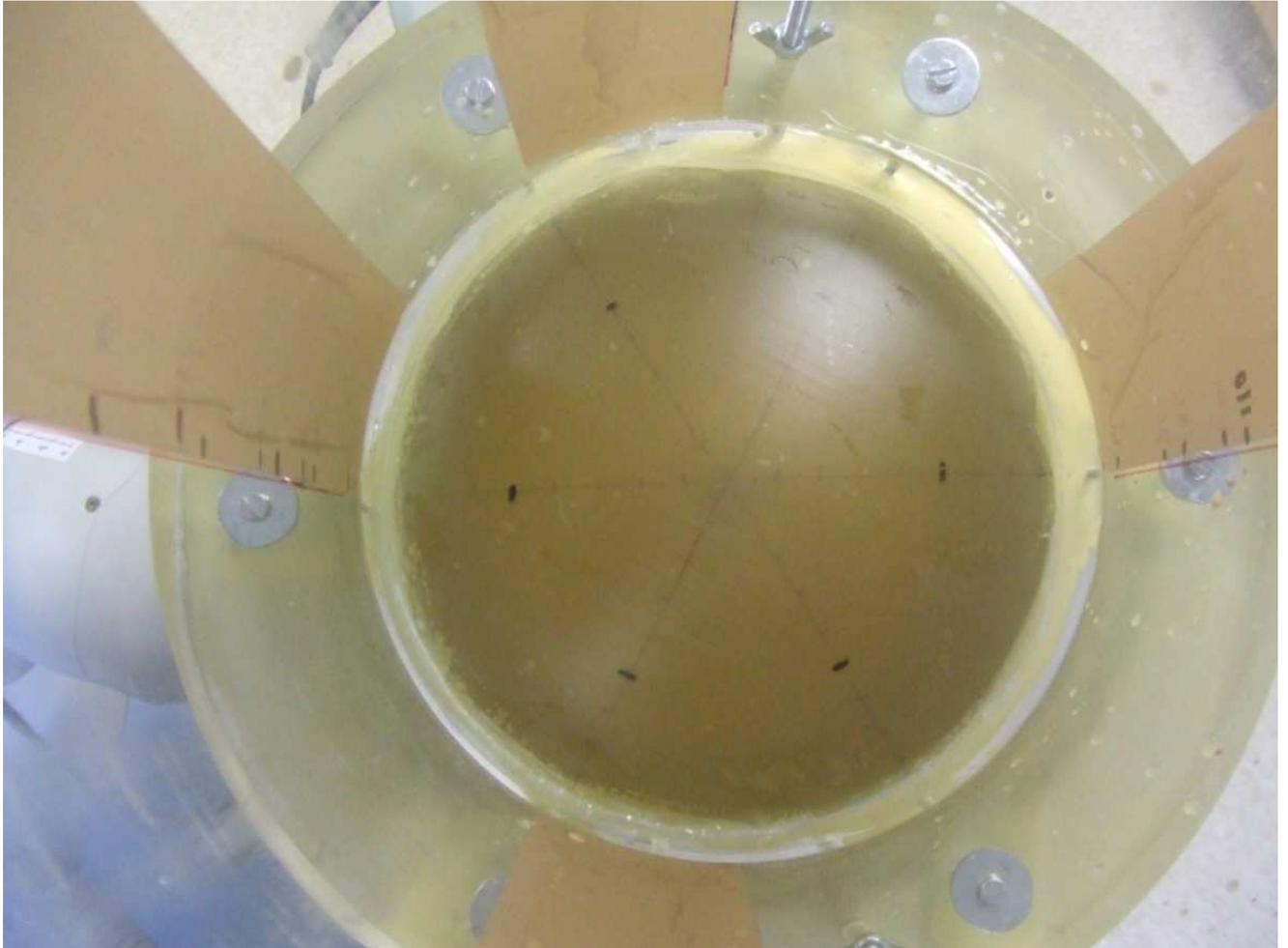


Abbildung 16: Blick von oben in den mod. Performancetopf / Testtopf, die braunen Streifen am Topf dienen zur Zentrierung der Steine in der Z - Achse.

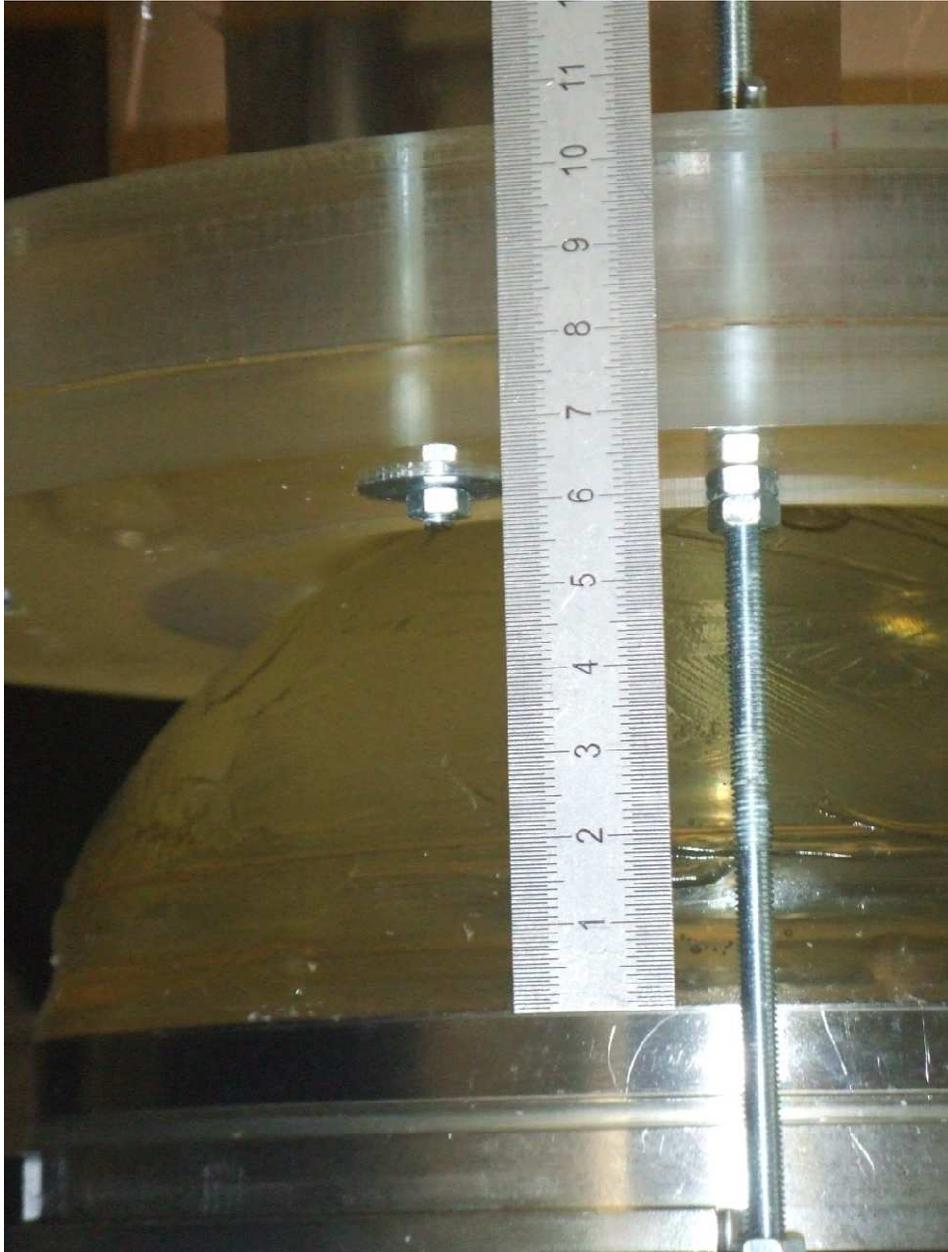


Abbildung 17: Detail mod. Performancetopf / Testtopf, 80 mm Abstand Membran / Oberkante Reflektor

Die zu fragmentierenden Steine werden in einen Steinhalter aus Netz mit einer Maschenweite von 2 mm eingehängt, wobei der Steinhalter in der axialen Verlängerung der Elektrode respektive der Z-Achse fixiert wird (Abb.18, 19).



Abbildung 18: Testaufbau: Steinhalter mit grünem Steinnetz im wassergefüllten mod. Performancetopf / Testtopf

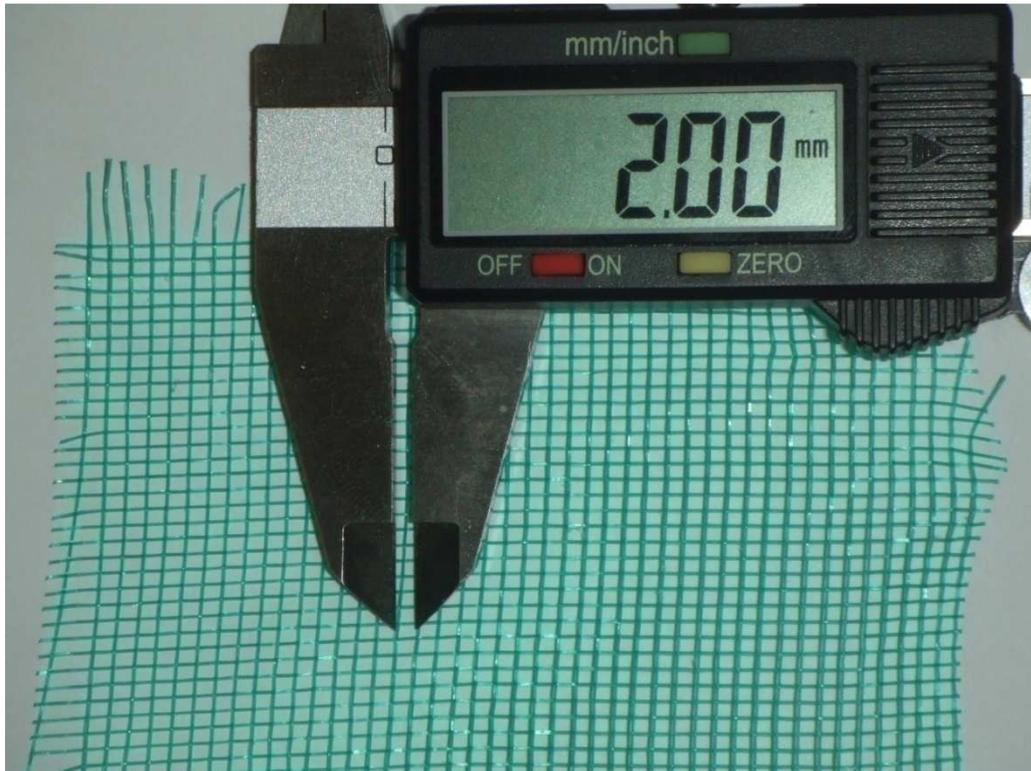


Abbildung 19: Netzmaterial, Maschenweite 2 mm

3.3.2. Die Reflektoren

In dem Lithotripsiesystem können zwei verschiedene Reflektoren verwendet werden, zum einen der originale Lithospace[®] Brennlinienreflektor, zum anderen ein Halbellipsoidreflektor mit den Ellipsenhalbachsenverhältnissen analog dem Reflektor des HM₃ (Kap. 3.3.2.2).

Physikalisch beruht die ESWL darauf, dass ein Punktstrahler in gleiche Raumwinkel gleiche Energien abgibt. Ellipsoide besitzen zwei geometrische Brennpunkte. Wenn ein Punktstrahler im Brennpunkt 1 eines Ellipsoids Energie abgibt, wird diese durch den Brennpunkt 2 gespiegelt. Bei einem Halbellipsoid, werden nur die Anteile der Gesamtenergie in den Brennpunkt 2 gespiegelt, die in Raumwinkel abgestrahlt werden, die bis zur Cut-off Ebene des Ellipsoids die Wand des Ellipsoids getroffen haben (Abb.20).

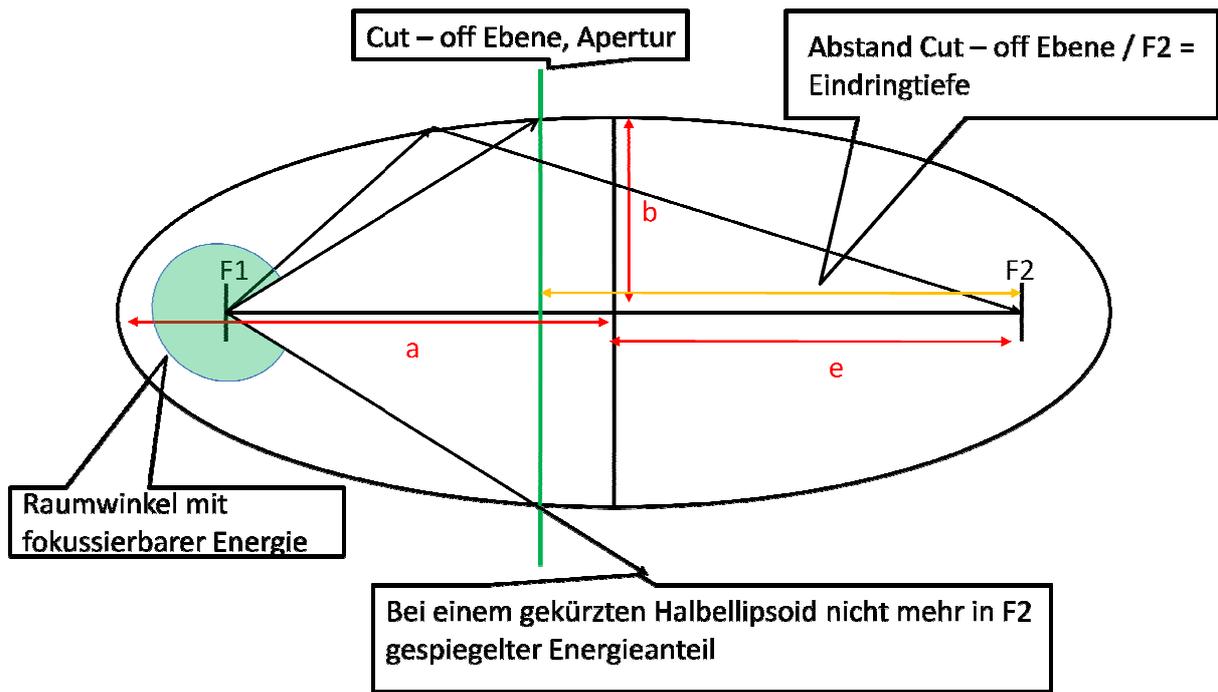


Abbildung 20: Schema eines Ellipsoids / Halbellipsoids mit den geometrischen Kennachsen, typischen Bezeichnungen und Entfernungen

Die Energieverteilung, die aus diesen physikalischen Grundlagen herrührt, folgt im wesentlichen einer Gaußschen Verteilung (Abb. 21). Dies gilt sowohl für den Halbellipsoidreflektor, wie auch für den Brennlinsenreflektor.

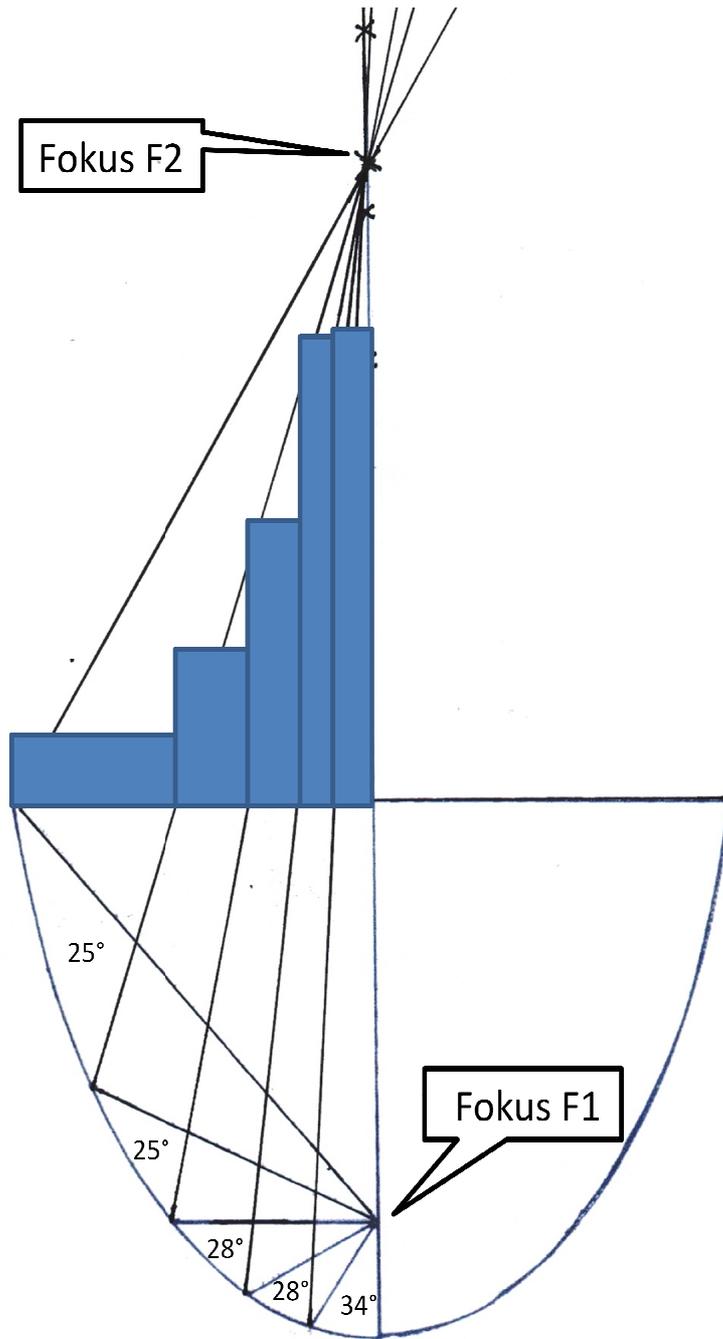


Abbildung 21: Rekonstruktion der Energieverteilung am Beispiel des klassischen Halbellipsoids

Die Reflektoren sind wie folgt zu beschreiben:

3.2.2.1. Der Brennlinsenreflektor

Der Brennlinsenreflektor leitet sich aus dem Halbellipsoidreflektor ab. Durch eine Änderung der Geometrie, einer minimalen, stufenlosen Aufweitung des Reflektors wird die Energie des Punktstrahlers in F1 (Elektrode) nicht mehr in einen F2 gespiegelt, sondern auf eine Linie, die Brennlinsenlinie, projiziert (Abb. 22).

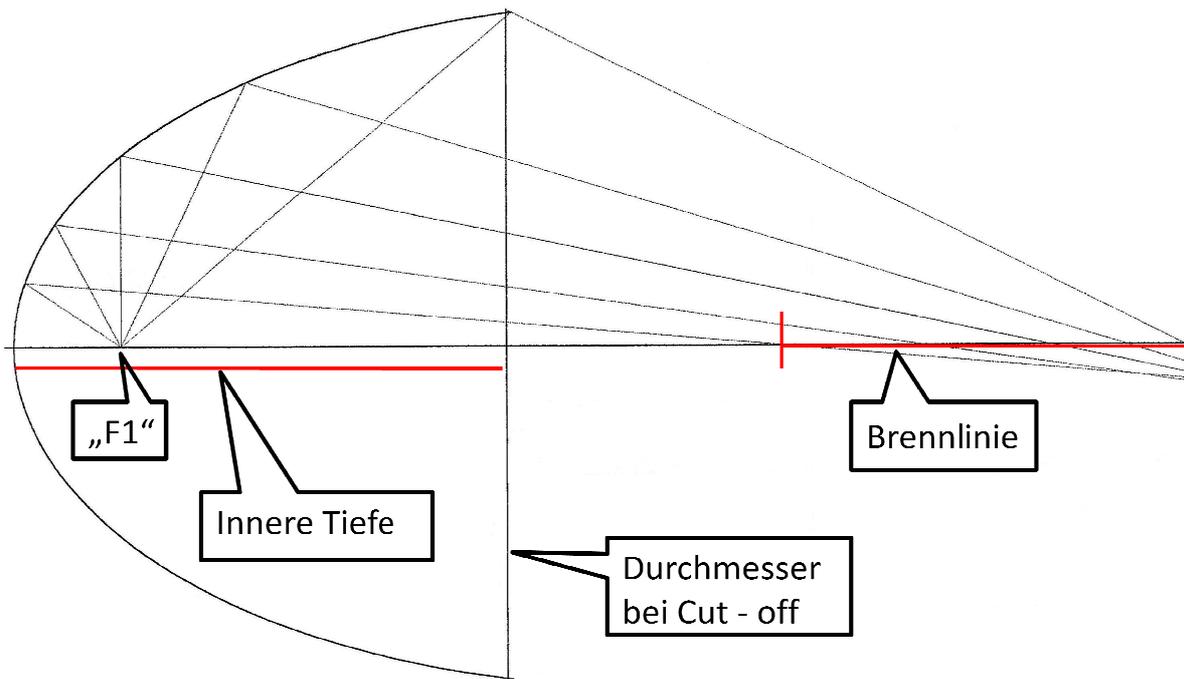


Abbildung 22: Schema Brennlinsenreflektor

Die technisch - geometrischen Daten des verwendeten Reflektors lauten:

Durchmesser bei Cut off: 178,6 mm

Innere Tiefe 130 mm

Brennpunkt „F1“ liegt 28,6 mm vom Scheitel des Reflektors entfernt

Brennlinsenlinie reicht von 80 mm bis 180 mm nach dem Cut – off

„Fokussierbare“ Raumwinkel: 210°

Abschattung durch die Elektrode: 68°

Die Druckkurve im Fokusbereich bei 16 kV ist durch ein Druckmaximum (p_{\max}) von 26,1 MPa und ein nachfolgendes Druckminimum (Zugwellenkomponente) (p_{\min}) von -3,6 MPa und eine Impulsdauer (bei halbem Maximaldruck) (t_{pw}) von 407 ns zu beschreiben. Die

folgende Abbildung (Abb.23) wurde aus den freundlicherweise von der Fa AST zur Verfügung gestellten Druckfeldmessungen der Universität Karlsruhe entnommen (40).

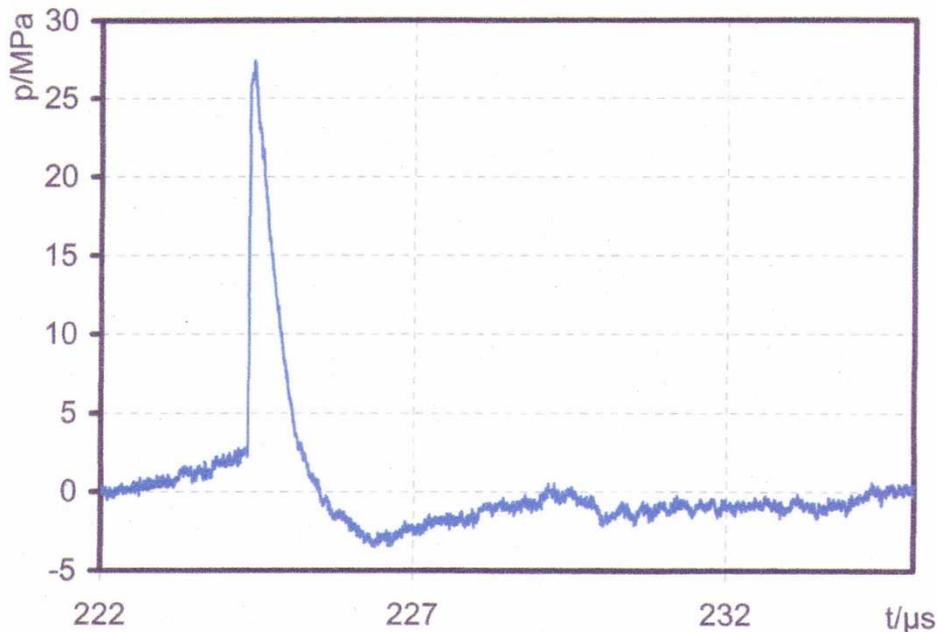


Abbildung 23: Druckkurve Brennlinsenreflektor bei 16 kV

3.3.2.2. Der Halbellipsoidreflektor

Ein Ellipsoid kann durch das Verhältnis seiner Halbachsen a / b ausreichend charakterisiert werden. Der Halbellipsoidreflektor folgt dem Beispiel des HM_3 – Reflektors (Abb. 24). Das Verhältnis a / b beträgt bei dem originalen HM_3 Reflektor 1,78; bei dem hier verwendeten Halbellipsoid 1,76 (46). Der Durchmesser in der Cut- off - Ebene ist damit relativ etwas weiter.

Die technisch–geometrischen Daten des Halbellipsoidreflektors:

Halbachse $a = 160$ mm

Halbachse $b = 91$ mm

Verhältnis a zu b : 1,76

Brennpunkt 28,4 mm vom Scheitel des Reflektors entfernt

Reduktion halbes Ellipsoid (a) zu Cut – off: 25 mm

Innere Tiefe: 135 mm

Durchmesser bei Cut – off: 179,76 mm

Eindringtiefe (Abstand Cut – off Ebene / F_2): 156,6 mm

Fokussierbare Raumwinkel: 212°

Abschattung durch die Elektrode: 68°

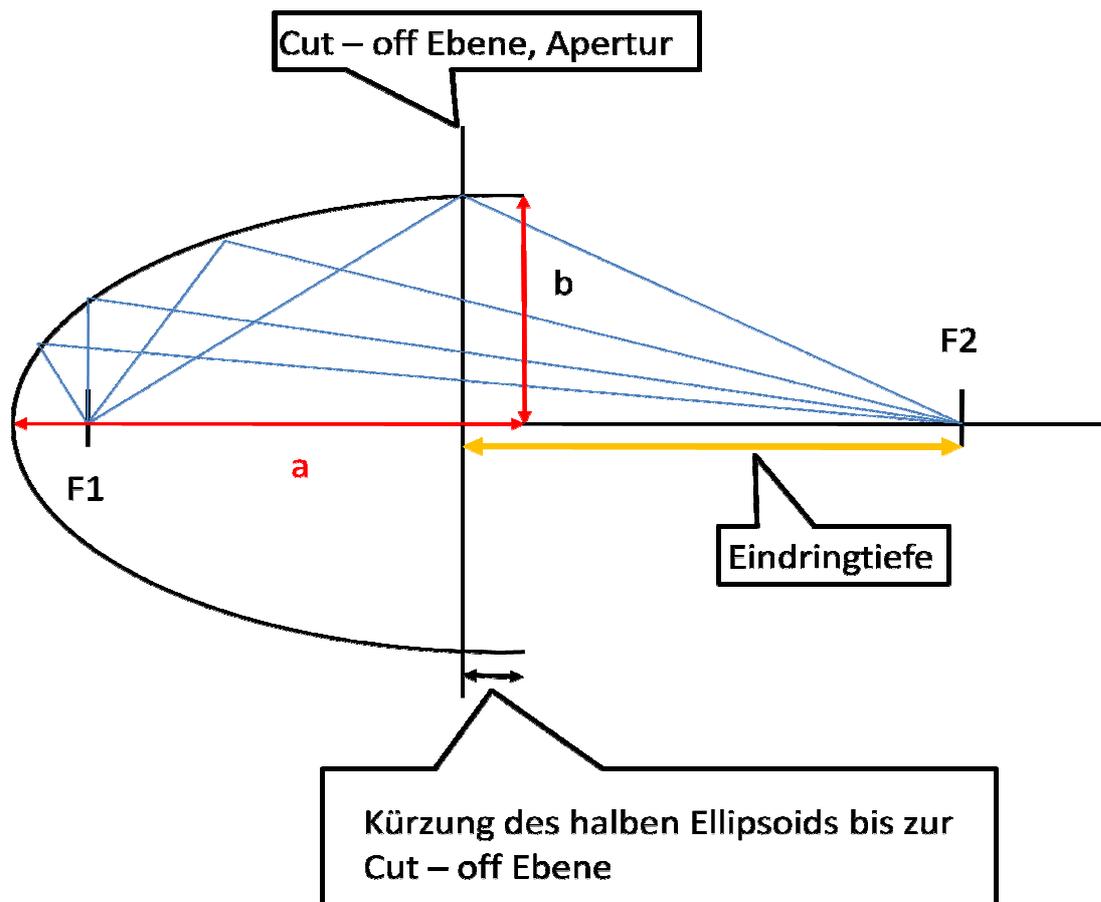


Abbildung 24: Schema Halbellipsoidreflektor

Für den verwendeten Halbellipsoidreflektor liegen keine Messwerte für die Beschreibung der Druckkurve im Fokalbereich vor. Die Werte für den HM₃ Reflektor sind bekannt, da identische Elektroden, Spannungen und nur minimal andere geometrische Daten vorliegen, dürfte die Druckkurve im Fokalbereich weitestgehend der des originalen HM₃ Halbellipsoids entsprechen. Die Druckkurve im Fokalbereich (Abb.25) ist durch ein Druckmaximum (p_{\max}) von 33 MPa und ein nachfolgendes Druckminimum (Zugwellenkomponente) (p_{\min}) von -9,5 MPa und eine Impulsdauer (bei halbem Maximaldruck) (t_{pw}) von 420 ns zu beschreiben (43).

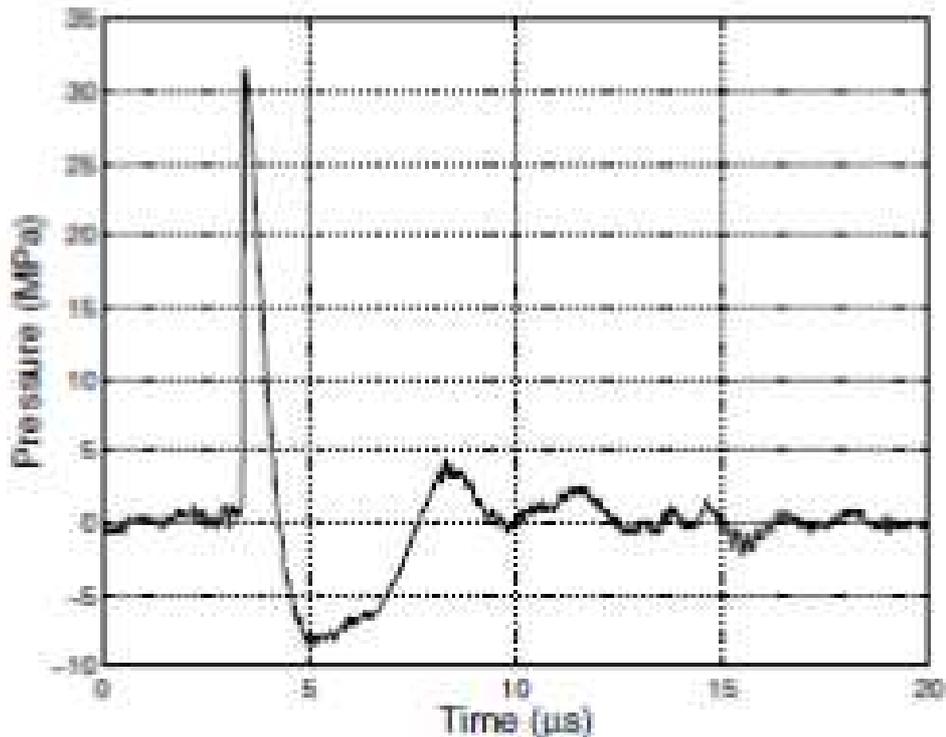


Abbildung 25: Druckkurve im Fokalbereich HM₃-Typ (43)

3.3.3. Die verwendeten Teststeine

Als Versuchsstein wird der Artificial Stone (AST) 0118 der Fa. Simmnacher, Reichenau eingesetzt (Abb. 26). Er ist zylindrisch, 10 mm hoch, Durchmesser 10 mm, Gewicht 0,7 g. Seine physikalischen Eigenschaften werden ausführlich von Heimbach et al 2000 beschrieben (Tab. 4) (18). Dieser Stein wird von mehreren Firmen (z.B. AST, Siemens) zur Konstanzprüfung von Lithotriptoren eingesetzt, wobei üblicherweise davon ausgegangen wird, dass eine Stoßwellenanzahl von maximal 300 zur kompletten Fragmentation eines Steins im Fokalbereich ein intaktes System anzeigt.

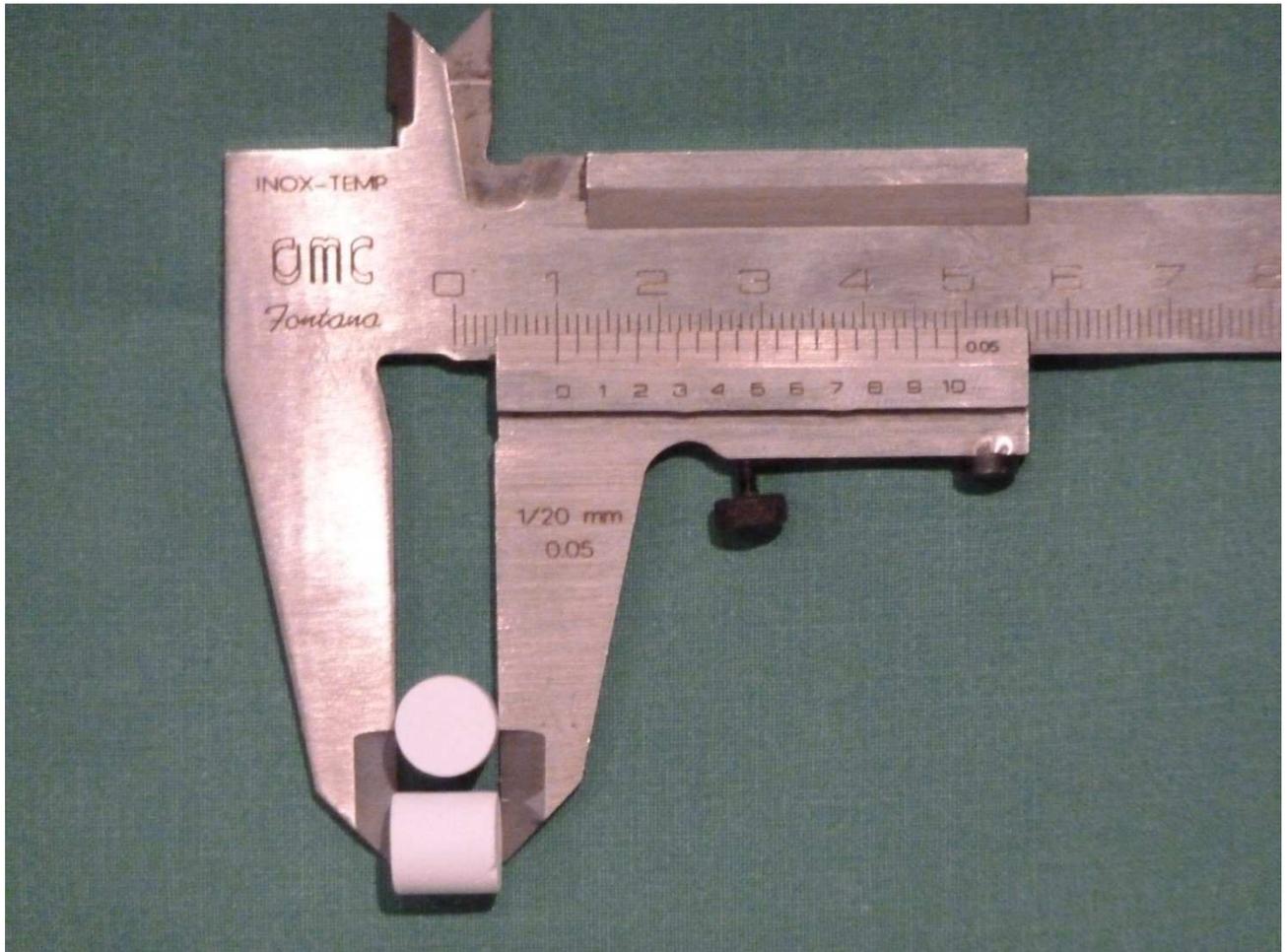


Abbildung 26: Zwei Kunststeine AST 0118

Eigenschaft	Wert
Dichte	$1.146 \pm 042 \text{ kg x m}^{-3}$
Longitudinale Wellengeschwindigkeit	$2.096 \pm 055 \text{ km x s}^{-1}$
Transversale Wellengeschwindigkeit	$1.189 \pm 059 \text{ km x s}^{-1}$
Longitudinale akust. Impedanz	$2.404 \pm 064 \text{ kg x m}^{-2} \text{ x s}^{-1} \text{ x } 10^6$
Transversale akust. Impedanz	$1.363 \pm 068 \text{ kg x m}^{-2} \text{ x s}^{-1} \text{ x } 10^6$
Dehnungsmodul	4,10 GPa
Schubmodul	1,63 GPa
Kompressibilität	2,88 GPa
Poisson-Zahl	0,26
Vickers-Härte	18,8 kg/mm^2

Tabelle 4: Eigenschaften des Kunststeins AST0118

Der Stein wird vor dem Versuch 15 min in 150 ml Aqua dest. gewässert.

Untersuchte Parameter

Es werden insgesamt 4 Variablen untersucht, die einen klinischen Bezug zur tatsächlichen Nierensteinbehandlung durch ESWL haben.

- 1.) Effektiver Abstand Reflektor / Stein: 110 mm, 150mm 180mm
- 2.) Koppelabstand: Abstand Reflektor / Wasserbad: 40mm, 80mm,
- 3.) Koppelfläche (Durchmesser): 100mm, 160 mm
- 4.) kV (Stoßwellenenergie) 16, 22, 26 kV

Daraus ergibt sich eine Anzahl von 36 Messungen pro Reflektor, insgesamt 72. Pro Meßpunkt wird ein Stein beschossen.

Effektiver Abstand Reflektor / Stein

Harnsteine können in verschiedenen Tiefen (Niere mit dorsalen und ventralen Kelchen, Harnleiter [Abb. 27,28]) im Körper vorkommen. Herkömmliche Lithotripsiesysteme haben konstruktionsbedingt einen zweiten Brennpunkt und damit einen fixen Abstand Reflektor / Stein. Mit dem Lithospace[®] Lithotripsiesystem ist ein Gerät verfügbar, dass aufgrund seiner großen Fokalzone, der Fokussierung auf eine Brennlinie, nicht mehr einen fixen Abstand Reflektor / Stein verlangt. Deshalb wurden drei verschiedene Steinabstände 110 mm, 150 m und 180 mm zum Reflektor untersucht. Der Abstand 150 mm entspricht in etwa dem Fokalabstand des Halbellipsoidreflektors von 156 mm, die axiale Fokusgröße entspricht der des originalen HM3 Reflektors von 40 mm, (136 – 176 mm), damit liegt der Stein im therapeutischen Fokus. Die Abstände 110, 150 und 180 mm liegen innerhalb der Brennlinie des Brennlinsenreflektors und damit in therapeutischen Bereich.

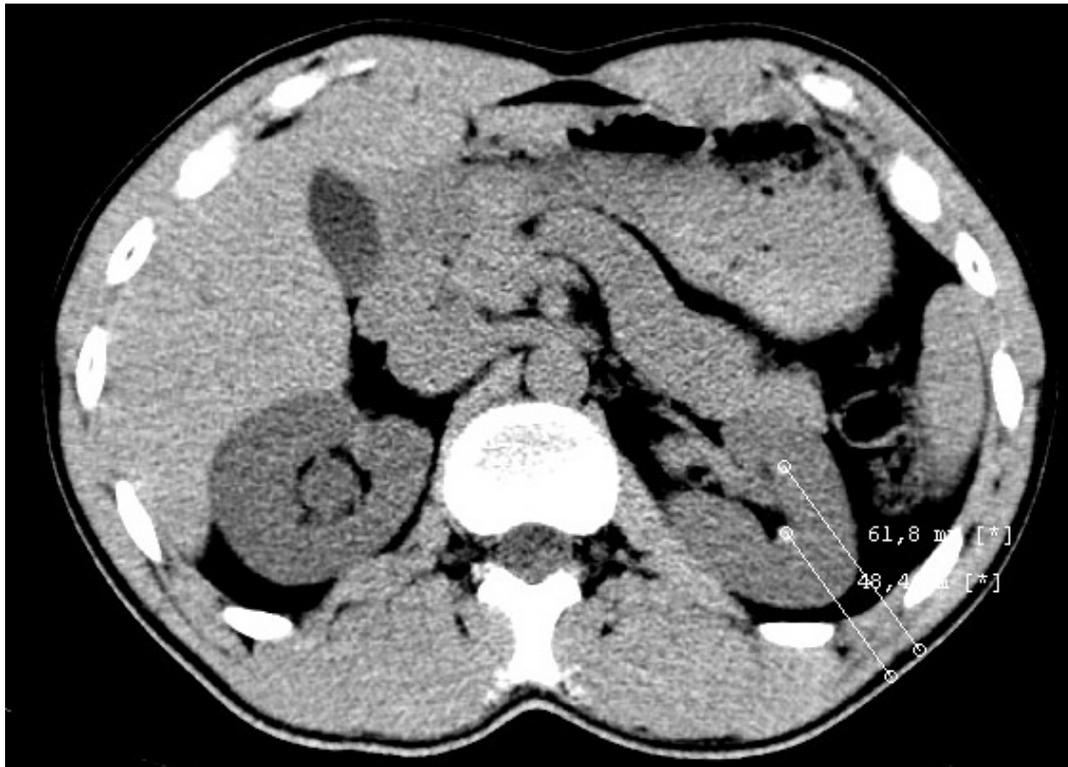


Abbildung 27: Schlanker Patient mit Stein in ventraler und dorsaler Kelchgruppe, 61 mm resp. 48 mm Tiefe ab Hautniveau



Abbildung 28: Adipöser Patient mit Steinen in ventraler und dorsaler Kelchgruppe, 152 mm resp. 133 mm ab Hautniveau

3.4.2. Koppelabstand (Abstand Reflektor / Wasserbad)

Der Abstand Reflektor / Wasserbad, genauer Oberkante Reflektor entspricht der klinischen Situation, dass bei fixem Abstand der Fokuszone die unterschiedliche Tiefe der Steine von der Haut ausgeglichen werden muss.

Beispiel: Ein Nierenstein 60 mm von der Haut gelegen, soll mit einem Lithotripsiesystem behandelt werden, dessen F_2 = Fokalgebiet 150 mm von der Reflektoroberkante liegt. Bei direkter Ankoppelung des Reflektors an die Haut würde das Fokalgebiet 90 mm tiefer im Körper liegen als der Stein, die 90 mm größere Eindringtiefe wird durch den ausfahrbaren Koppelbalg ausgeglichen, Koppelabstand also 90 mm. Ein anderer Fall, bei dem der Stein 130 mm unter der Haut, z.B. im oberen Harnleiter liegt, führt zu einer sehr kurzen Ausgleichsstrecke, Koppelabstand von 20 mm Reflektor / Haut. Für die Versuche wurden zwei Koppelabstände, 40 und 80 mm, entsprechend der Situation tiefe Steinlage / adipöser Patient resp. oberflächliche Steinlage / schlanker Patient gewählt (Abb. 29). Damit gilt: Abstand Reflektor / Wasserbad = Koppelabstand beim Patienten.

In einer abstrakteren Betrachtung, kann der Koppelabstand mit der Höhe einer Blende in einem Strahlengang gleichgesetzt werden.

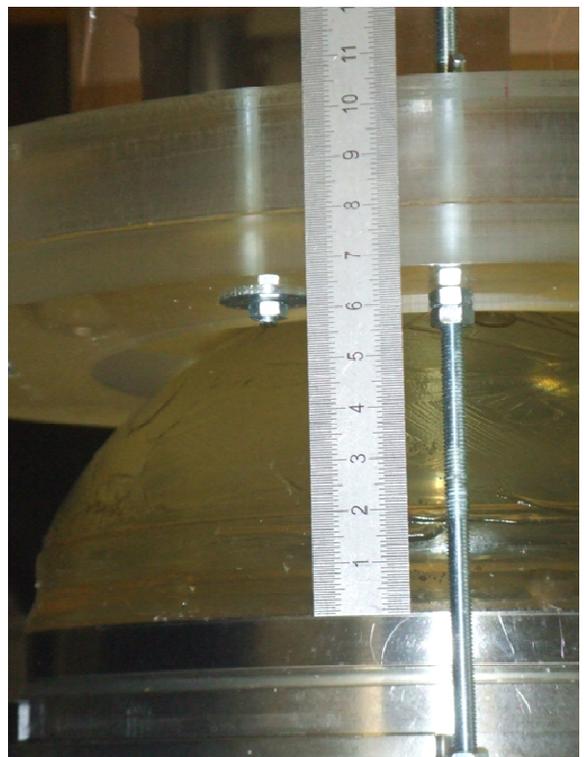


Abbildung 29: Koppelabstand 40 mm und 80 mm ab Oberkante Reflektor

3.4.3. Koppelfläche

Die Koppelfläche, die Fläche, durch die die Stoßwellenenergie in den Körper eindringen kann, ist je nach Füllung des Koppelbalgs unterschiedlich groß.

Bei oberflächennaher Steinlage, also großem Abstand Körper / Reflektor, ist der Koppelblag sehr weit ausgefahren, dies führt bei der ballonartigen Form des Koppelbalges zu einer kleinen Ankoppelfläche (Abb.30). Typisch hier die Anwendung bei Kindern.



Abbildung 30: Kleine Koppelfläche, z.B. Kind, schlanker Patient, dorsaler Kelchstein, oberflächlicher Steinsitz

Umgekehrt führt ein tiefer Steinsitz zu einem kleinen Koppelabstand und damit zu einer breiten Koppelfläche (Abb.31). Typisch hier die Anwendung bei adipösen Patienten.

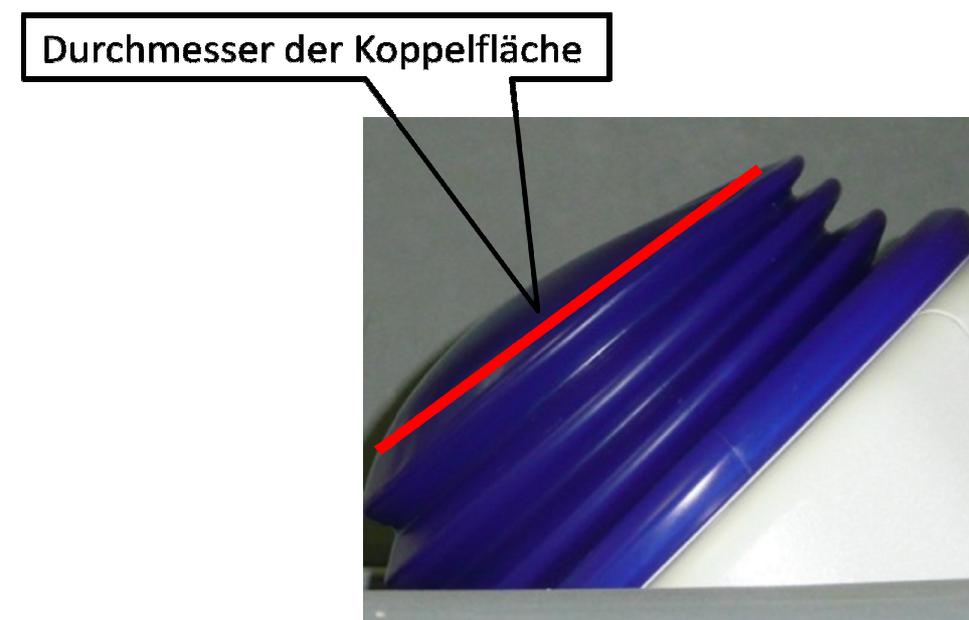


Abbildung 31: Breite Koppelfläche, z.B. adipöser Patient, ventraler Kelchstein / tiefer Steinsitz

Grob klinisch kann man sagen, die Koppelfläche ist umgekehrt proportional zum Koppelabstand.

Es werden hier die Koppelflächen mit einem Durchmesser 100 mm, entsprechend großer Koppelabstand / schlanker Patient / oberflächennaher Steinsitz und 160 mm, entsprechend geringer Koppelabstand / adipöser Patient / oberflächenferner Steinsitz untersucht. Im folgenden wird von der Koppelfläche Durchmesser 100 mm als Koppelfläche 100 mm, analog 160 mm, gesprochen.

In einer abstrakteren Betrachtung kann die Koppelfläche mit der Öffnung, Apertur einer Blende in einem Strahlengang gleichgesetzt werden.

3.4.4. Stoßwellenenergie / Generatorspannung (kV)

Der Abbrand der Elektrodenspitzen während einer ESWL Behandlung führt dazu, dass die Generatorspannung, die zur Erzeugung der Unterwasserfunkenentladung nötig ist, ansteigt. Deshalb werden drei Spannungen 16, 22, 26 kV (Eingangsspannung, mittlere Behandlungsspannung und maximale Spannung) untersucht. Die Generatorspannung V entspricht im Wesentlichen der Stoßwellenenergie.

3.5. Geometrische Rekonstruktion

Um die Auswirkung der Parameter: Koppelfläche, Koppelabstand auf die fokussierbare Energie festzustellen, werden geometrische Rekonstruktionen für den Brennlinsenreflektor und den Halbellipsoidreflektor auf Grundlage von maßstabsgerechten Zeichnungen, die von AST zur Verfügung gestellt werden, hergestellt.

3.5.1. Brennlinsenreflektor

Die folgenden zwei Zeichnungen zeigen die Auswirkungen der unterschiedlichen Koppelflächen und der Koppelabstände auf die fokussierbare Energie bei dem Brennlinsenreflektor (Abb.32, 33).

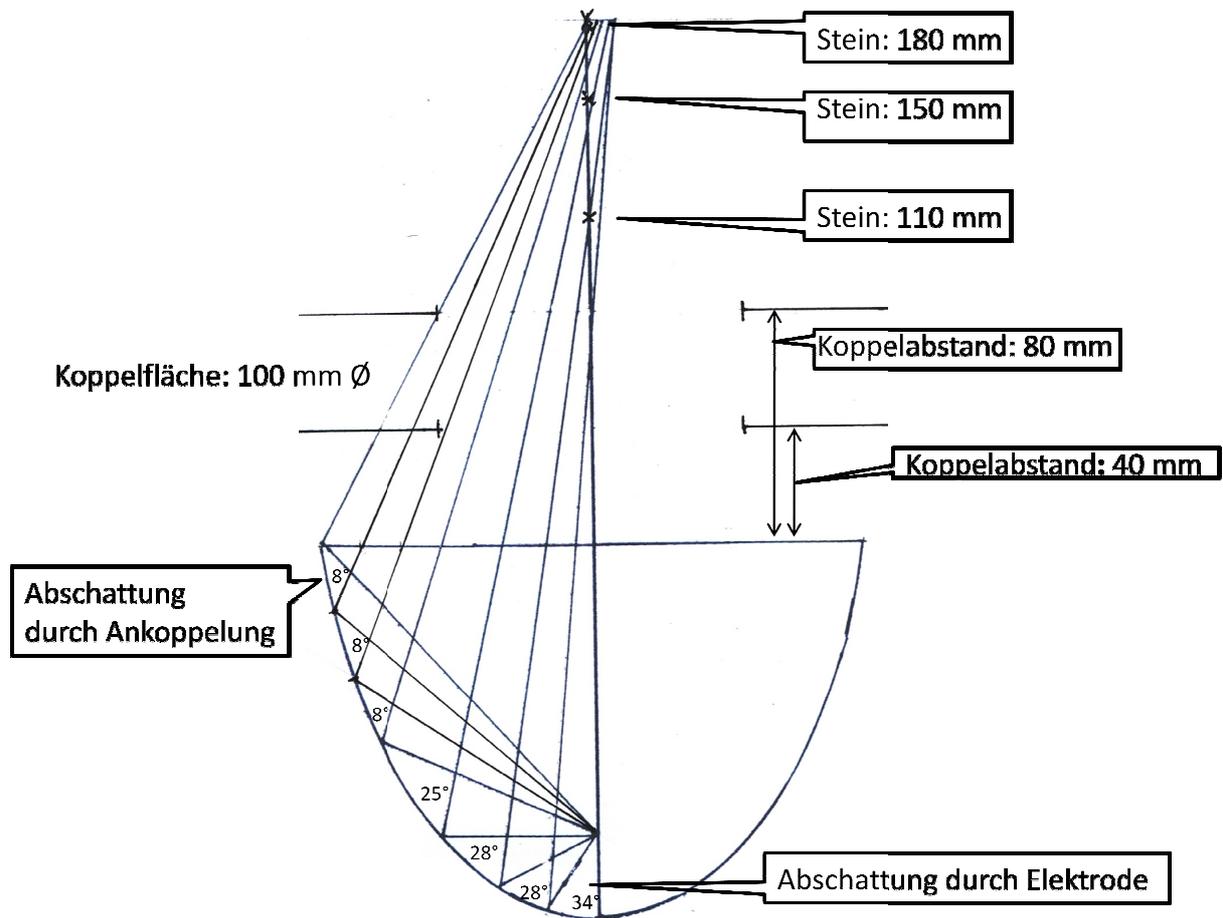


Abbildung 32: Ausmaß der geometrischen Abschattung bei dem Brennlinsenreflektor durch die Ankoppelung, hier Abschattung bei Koppelabstand 40 mm und Blendenfläche 100 mm : ca. 15%

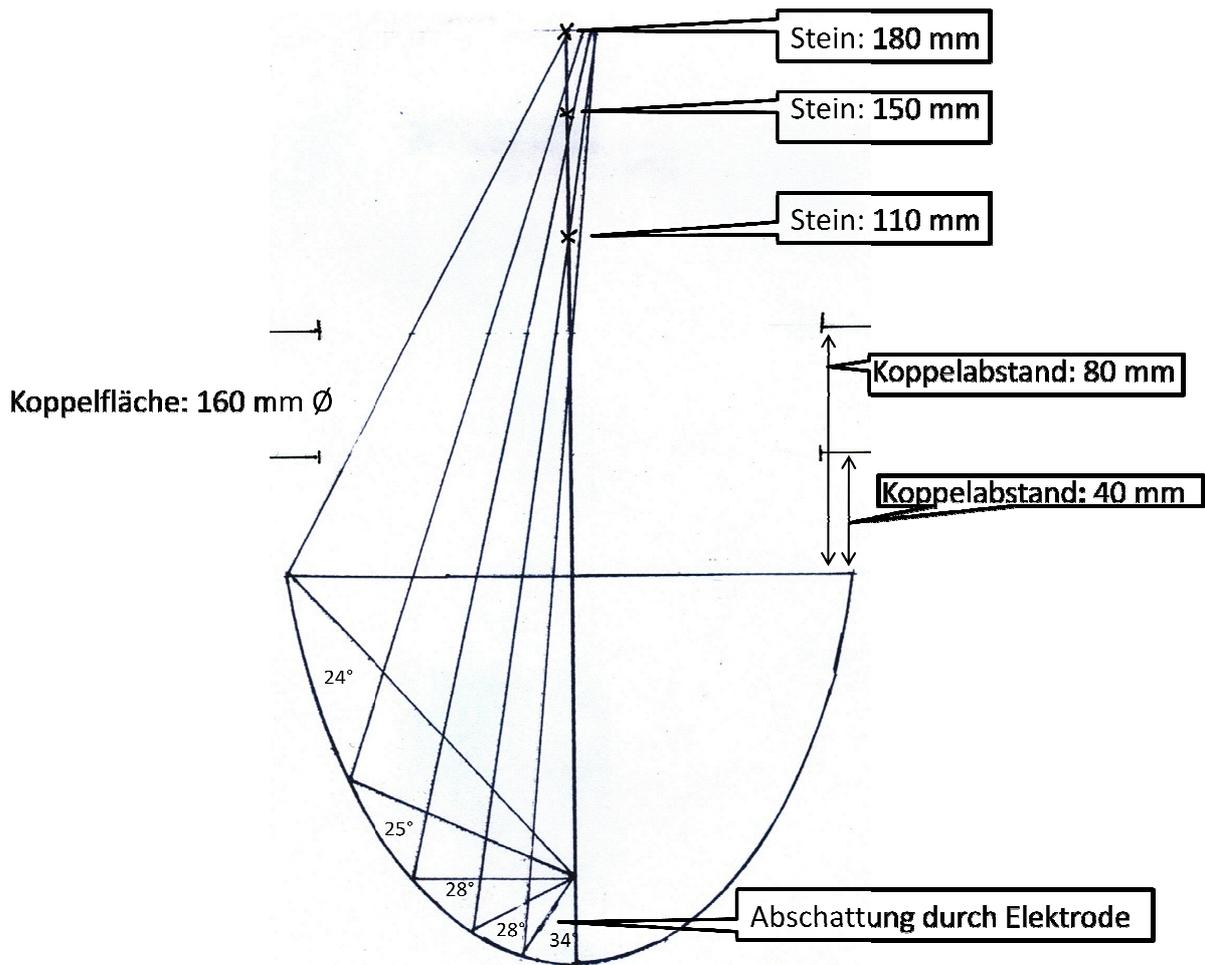


Abbildung 33: Ausmaß der geometrischen Abschattung bei dem Brennlinsenreflektor durch die Ankoppelung. Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 40 und 80 mm, hier ist keine Abschattung zu erwarten.

Die geometrische Rekonstruktion zeigt lediglich bei der Koppelfläche 100 mm und dem Koppelabstand 40 mm eine geometrische Abschattung der fokussierbaren Energie von ca. 15%. Für die Koppelfläche 160 mm mit den Koppelabständen 80 mm und 40 mm findet keine geometrische Abschattung der fokussierbaren Energie statt.

3.5.2. Halbellipsoidreflektor

Die folgenden zwei Zeichnungen zeigen die Auswirkungen der unterschiedlichen Koppelflächen und der Koppelabstände auf die fokussierbare Energie bei dem Halbellipsoidreflektor (Abb. 34,35).

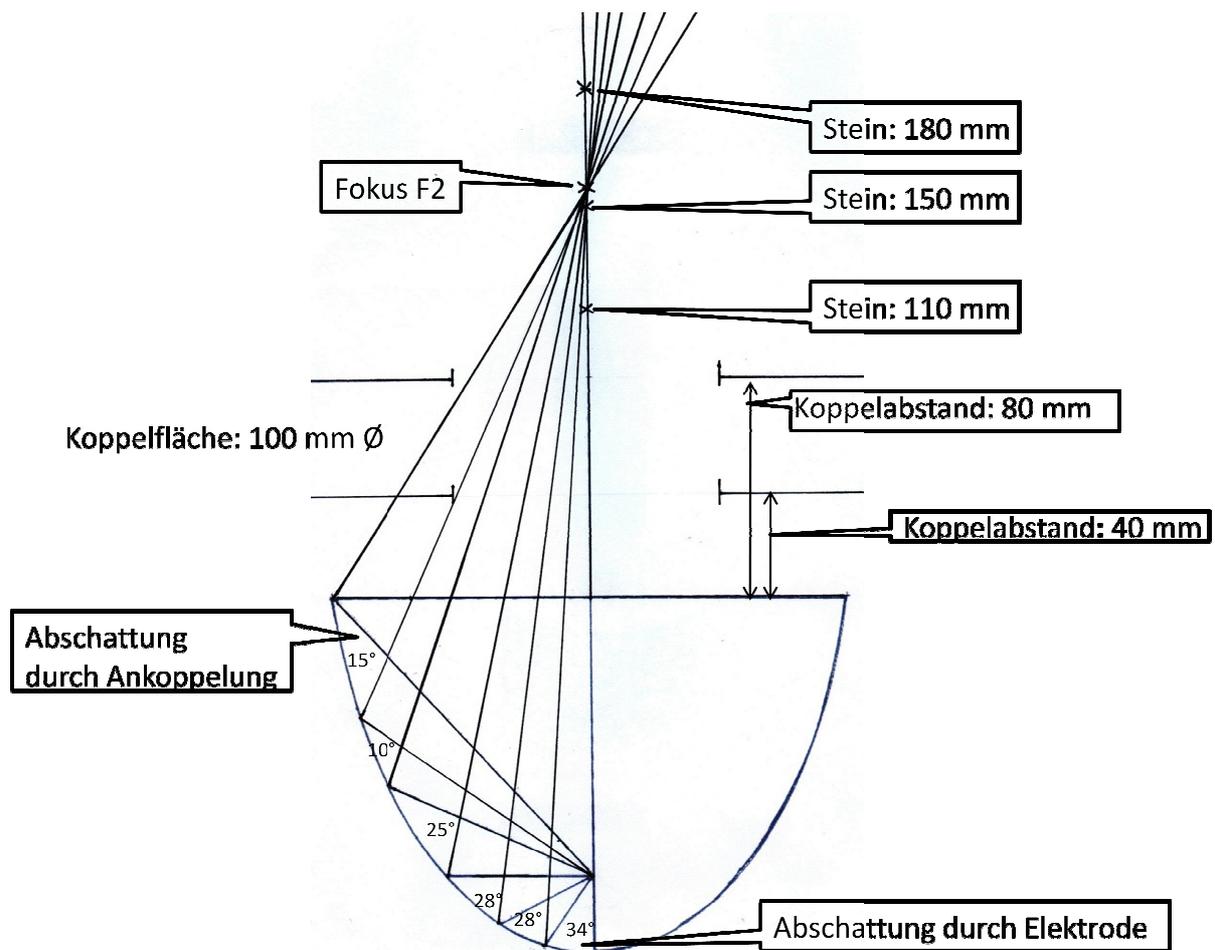


Abbildung 34: Ausmaß der geometrischen Abschattung bei dem Halbellipsoidreflektor durch die Ankoppelung, hier Abschattung bei Koppelabstand 40 mm und Koppelfläche 100 mm : ca. 15% .

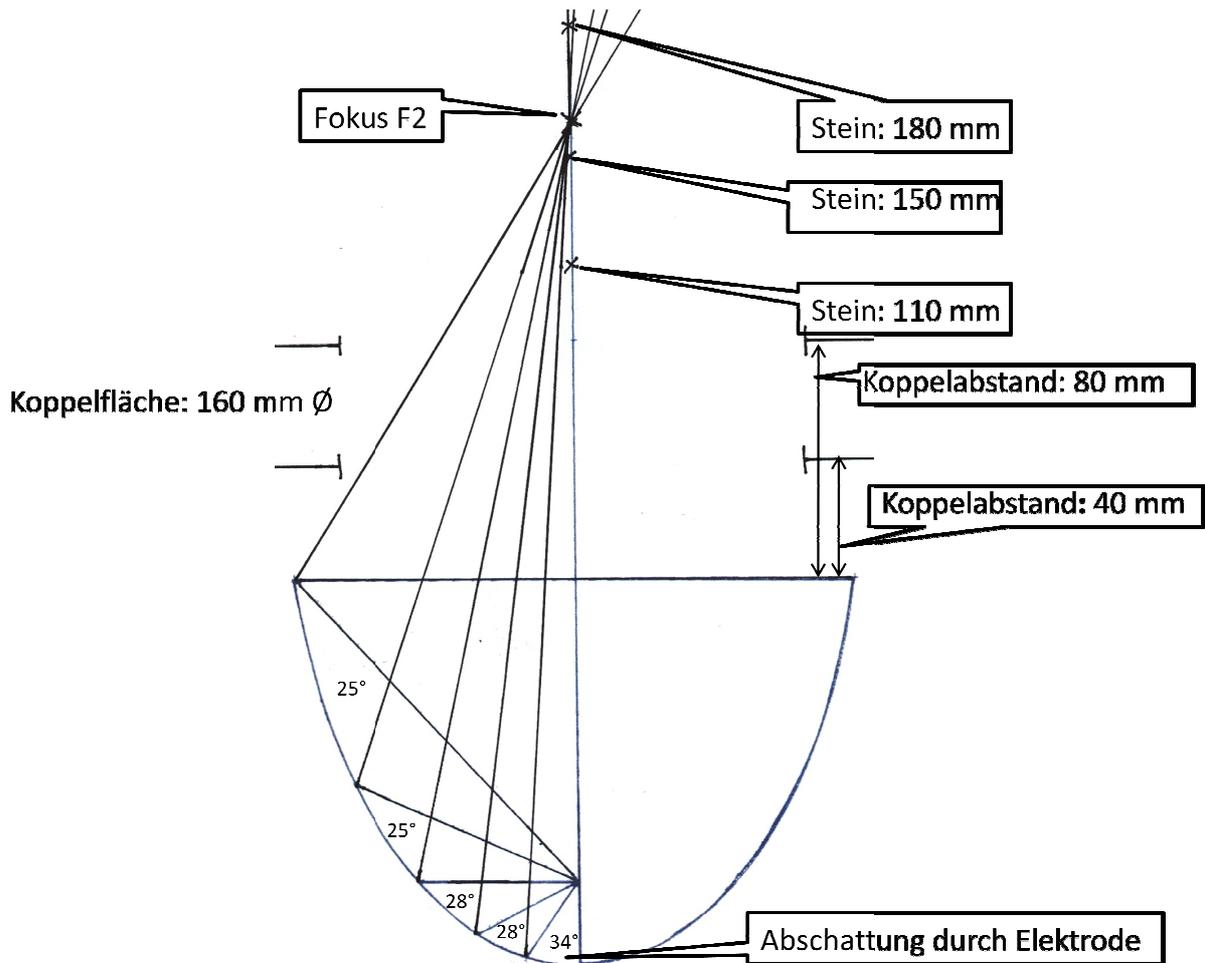


Abbildung 35: Ausmaß der geometrischen Abschattung bei dem Halbellipsoidreflektor durch die Ankoppelung, Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 40 mm und 80 mm. hier keine Abschattung

Zusammenfassend zeigt die geometrische Rekonstruktion für den Halbellipsoidreflektor, wie auch für den Brennlinsenreflektor, lediglich bei der Blendenweite 100 mm und der Blendenhöhe 40 mm eine geometrische Abschattung der fokussierbaren Energie von ca. 15%. Für die Koppelfläche 160 mm mit den Koppelabständen 80 mm und 40 mm findet keine geometrische Abschattung der fokussierbaren Energie statt.

3.6. Versuchsdurchführung

Während der 15 minütigen Einweichzeit des Steins in 150 ml Aqua dest. wird eine mit 600 STW eingeschossene Dornier Standardelektrode in den Therapiekopf des Lithospace[®] eingelegt, der Koppelbalg mit reichlich handelsüblichem Ultraschallgel versehen. Der Performancetopf wird mit den vier Gewindestangen auf die gewünschte Höhe über der Reflektoroberkante fixiert und der Koppelbalg so weit gefüllt, dass die gewünschte Koppelsituation (Koppelfläche/Ankoppelhöhe) erreicht wird. Die Koppelfläche wird durch optische Kontrolle der Kontaktfläche und der Grenzmarkierungen auf der Membran des Performancetopfs eingestellt. Zur Sicherheit wird bei der Koppelfläche 100 mm eine ringförmige Luftpolsterfolie als schallweiche zusätzliche Blende zur Ausblendung der Stoßwellenenergie verwendet (Abb. 36).

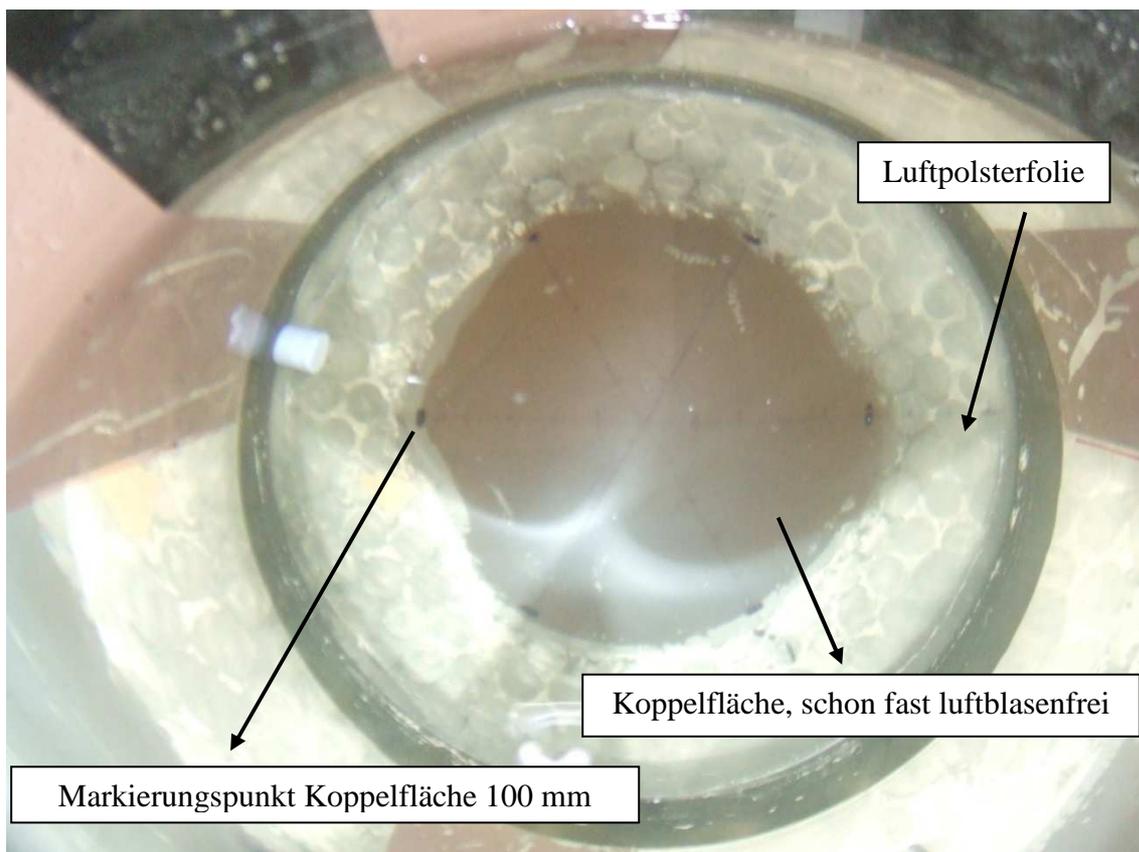


Abbildung 36: Blick in den Testtopf, schon mit Wasser gefüllt, Koppelfläche 100 mm Durchmesser, Luftpolsterfolienring am Platz, Koppelfläche noch nicht 100% luftblasenfrei

Es wird daraufhin der Performancetopf mit Wasser gefüllt. Das Gewicht des Wassers kann die Ankoppelsituation verändern, darum wird erst jetzt die Feineinstellung Koppelfläche und die Entfernung der Luftblasen im Koppelmedium durchgeführt. Es wird darauf geachtet, dass keine Luftblasen im Koppelmedium verbleiben (Abb. 37).

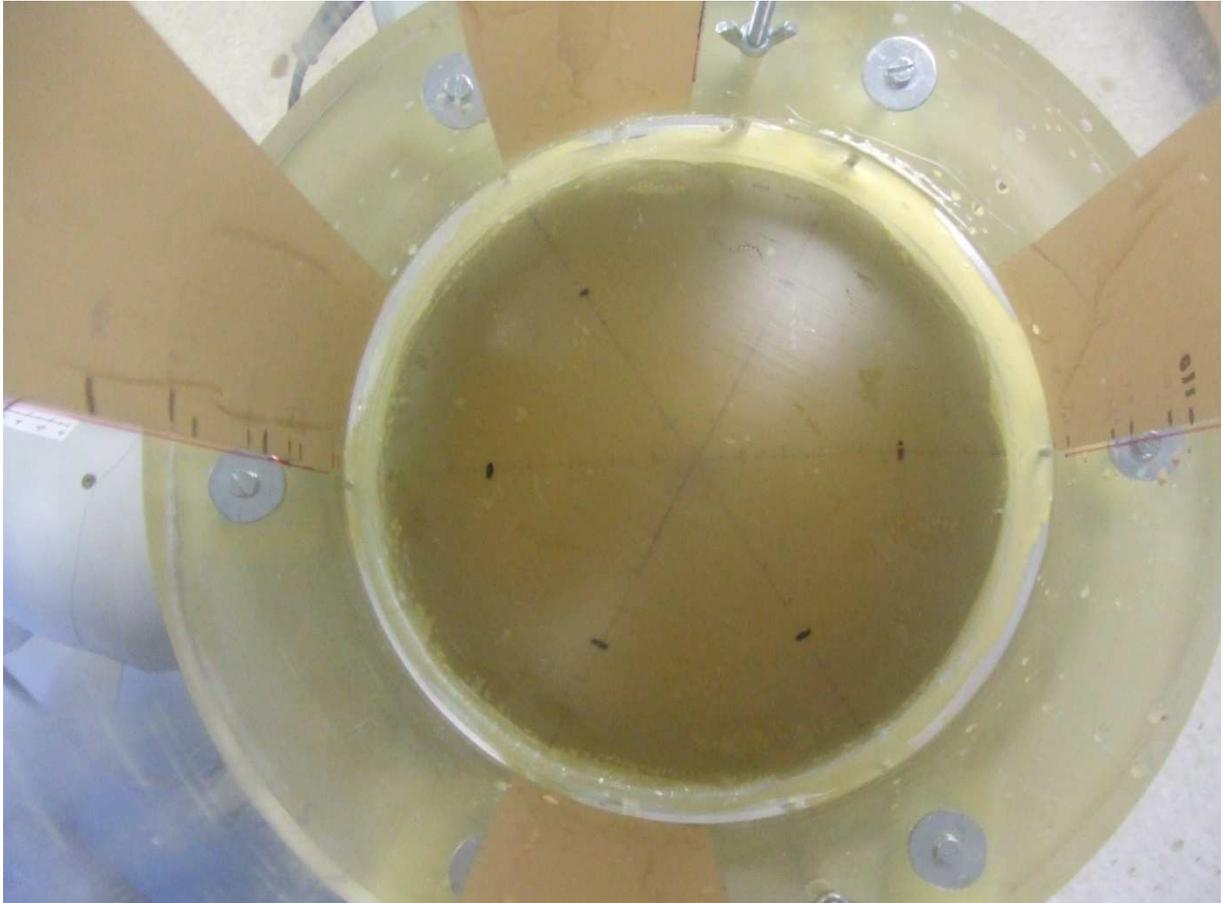


Abbildung 37: Koppelfläche 160 mm, Luftblasenfrei

Anschließend wird der Steinhalter in den Performancetopf eingehängt und die Lage des Steins – Höhe über Reflektor, Zentrierung optisch über die Markierungen auf dem Performancetopf kontrolliert (Abb.38, 39).

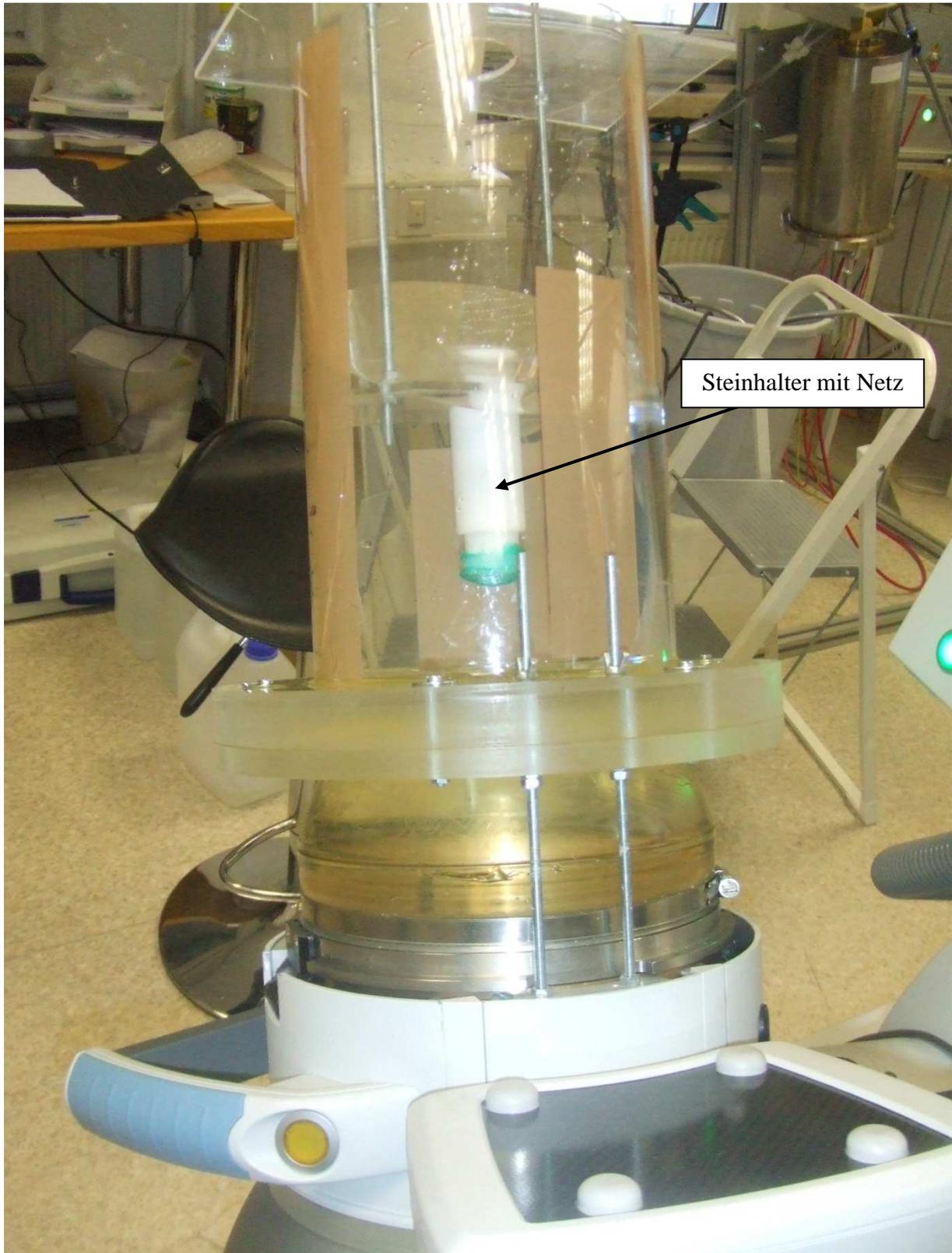


Abbildung 38: Situation vor Beginn der Fragmentation

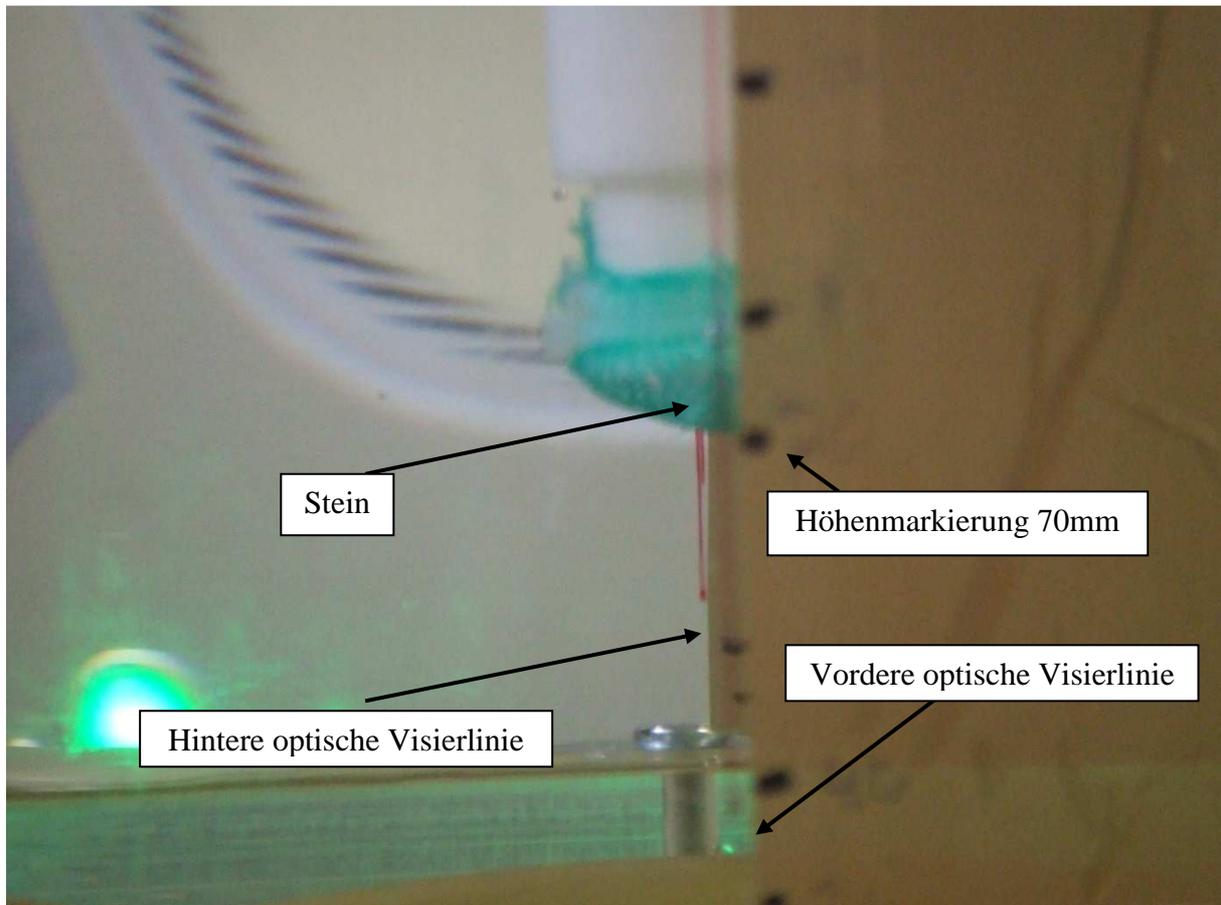


Abbildung 39: Detail Steinpositionierung: Steinlage 110 mm über Reflektor (70 mm über Membran Performancetopf + 40 mm Abstand Membran / Oberkante Reflektor), Stein zentriert, Blick etwas gedreht, um beide optischen Hilfslinien zu zeigen

Die Fragmentation wird mit der Frequenz 1 Hz durchgeführt. Die Stoßwellenanzahl bis zur vollständigen Fragmentation wird notiert. Als vollständige Fragmentation gilt, wenn sich kein Steinfragment mehr im Netz des Steinhalters befindet, also der Stein in Teile kleiner 2 mm zerfallen ist. Danach wird der nächste Stein in das Netz des Steinhalters gelegt und der Stein entsprechend positioniert. Dies kann mehrfach erfolgen, bis durch die Schwebeteile der fragmentierten Steine die Sicht auf den aktuellen Stein so schlecht wird, dass eine korrekte Beurteilung der Positionierung, resp. der Fragmentation nicht mehr möglich ist. Wenn nach 300 Stoßwellen der Stein noch nicht vollständig fragmentiert ist, wird der Steinhalter entfernt, die Fragmente ausgeklopft und das anhaltende Wasser mittels Löschpapier entfernt.

Nach 24 stündiger Trocknung bei Raumtemperatur werden die Fragmente ausgewogen und mittels Dreisatz die benötigte Stoßwellenanzahl bis zur vollständigen Fragmentation extrapoliert, wobei

X = extrapolierte Stoßwellenzahl

G₀ = Steingewicht Anfang

G₃₀₀ = Steingewicht nach 300 Stoßwellen ist.

Damit ergibt sich die Formel:

$$X = 300 \times \frac{G_0}{G_0 - G_{300}}$$

Beispielsweise wird bei einem Abtrag von 0,2 gr durch 300 Stoßwellen eine Stoßwellengesamtzahl von 1050 hochgerechnet. Tatsächlich kommt es durch den Elektrodenabbrand der verwendeten Dornier Elektrode dazu, dass 1050 Stoßwellen mit einer kV Einstellung technisch nicht möglich sind. Zum anderen muss in Betracht gezogen werden, dass unter technischen Gesichtspunkten 100 Stoßwellen in einem Gipskugelmodell ca. 1000 Stoßwellen im Menschen entsprechen. Deshalb sind die Werte ab 1400 Stoßwellen (Abtrag 0,15 gr nach 300 Stoßwellen) mit großer Zurückhaltung zu bewerten. Sie besitzen in Bezug auf den klinischen Einsatz beim Menschen keine Relevanz mehr, da bei entsprechenden Parametern eine inakzeptabel hohe Stoßwellenanzahl (14 000) appliziert werden müsste.

3.7. Statistik

Die eingehende Beratung durch Herrn Prof. Dr. G. Wassmer und Herrn Dr. rer. medic. J. Franklin aus dem Institut für Medizinische Statistik, Informatik und Epidemiologie der Universität zu Köln führt nach eingehender Abwägung dazu, dass auf eine intensivere statistische Bearbeitung der Werte verzichtet wird, da jeweils nur ein Meßwert zu jedem Meßpunkt vorliegt.

4. Ergebnisse

In den Tabellen sind auch die rechnerischen Werte der Fehlerabschätzung mit dargestellt. Die Ableitung des Gesamtfehlers von 20% wird im Abschnitt Fehlerdiskussion 5.1.2. ausführlich beschrieben. Es wird die Anzahl der Stoßwellen entsprechend den Fehlerprozenten sowie die daraus folgende obere und untere Fehlergrenze angegeben.

Um die Anschaulichkeit der Werte zu erhöhen, werden im folgenden jeweils die vier Parameter (Effektiver Abstand Reflektor - Stein, Koppelabstand, Koppelfläche und Stoßwellenenergie/Generatorspannung kV) als Variable bei ansonsten konstanten übrigen Bedingungen beispielhaft dargestellt. Die Stoßwellenanzahl ist jedesmal die Ordinate. In diesen Graphiken werden lediglich die „Rohwerte“ dargestellt, auf die Darstellung des interpretationsfähigen Fehlerbereichs verzichtet.

Bei der Blendenstellung 40 mm Abstand mit Koppeldurchmesser 100 mm (18 / 72 Meßpunkte) findet eine geometrische Abschattung der Stoßwellenenergie statt. Die geometrische Rekonstruktion (Abb.: 32 bis 35) zeigt eine Abschattung von 15% der Stoßwellenenergie.

Dies liegt knapp unter dem Ausmaß des angenommenen Gesamtfehlers und ist nicht in dem Gesamtfehler berücksichtigt.

Unter der Annahme, dass 15% weniger Energie 15% mehr Stoßwellen zur Folge hat, wurden die Ergebnisse der betroffenen Meßpunkte um 15% reduziert und als zusätzliche Meßpunkte in den Graphiken dargestellt.

Eine weitere Serie von Graphiken wird die Stoßwellenanzahl bei Abstand Koppelfläche 40 und 80 mm sowie Koppelfläche 100 und 160 mm bei identischem effektiven Abstand und gleicher Generatorspannung je Reflektortyp darstellen. Die Parameter Koppelabstand und Koppelfläche können zusammen als schallweiche Blende in einem Strahlengang betrachtet werden.

Bei diesen Graphiken sind die Fehlerbereiche mit dargestellt, da sie für die Entscheidung hat die Koppelsituation einen Einfluss oder nicht, relevant sind.

Wenn die schallweiche Blende außerhalb, resp. knapp (15% Abschattung bei 18 von 72 Meßpunkten) innerhalb des geometrischen Strahlengangs liegend, keinen oder nur geringen Einfluss auf die Zertrümmerungsleistung hat, so sollten die vier (fünf mit korrigierten Werten) dargestellten Ergebnisse nur innerhalb eines engen Bereichs differieren.

Zur grundsätzlichen Frage, ob überhaupt ein Blendeneffekts existiert, wurden die Ergebnisse der verschiedenen Koppelstellungen bei konstantem Abstand und konstanter Energie verglichen, ob die Fehlerbereiche sich überlappen oder nicht, ob sie sich unterscheiden oder nicht.

Zur Beantwortung der Frage, welchen Einfluss welche Blendenstellung hat, wurden die Ergebnisse der verschiedenen Koppelstellungen bei konstantem Abstand und konstanter Energie mit Rangsummen versehen und so der Einfluss auf die Zertrümmerungsleistung eingeschätzt. Bei sich überlappenden Fehlerbereichen wurde die gleiche, niedrigere Rangsumme vergeben, die höhere darauf nicht vergeben.

4.1.1 Ergebnisse mit dem Brennlinsenreflektor (Tabelle)

Die folgende Tabelle (Tab.5) stellt die Ergebnisse der Versuche mit dem originalen Brennlinsenreflektor des Lithospace[©] – Lithotriptors dar.

Abstand Reflektor / Wasserbad(mm)	Kopffläche (mm)	Eff. Abstand (mm)	kV	Stoßwellen	Fehler 20% ± Stoßwellen	Oberer Wert	Unterer Wert
40	100	110	16	2100	420	2520	1680
40	100	110	22	525	105	630	420
40	100	110	26	171	35	205	137
40	100	150	16	2100	420	2520	1680
40	100	150	22	279	56	335	223
40	100	150	26	214	43	257	171
40	100	180	16	2100	420	2520	1680
40	100	180	22	600	120	720	480
40	100	180	26	245	49	294	196
40	160	110	16	2100	420	2520	1680
40	160	110	22	525	105	630	420
40	160	110	26	182	37	218	146
40	160	150	16	1400	280	1680	1120
40	160	150	22	129	26	155	103
40	160	150	26	62	12	74	50
40	160	180	16	1400	280	1680	1120
40	160	180	22	174	35	209	139
40	160	180	26	176	35	211	141
80	100	110	16	1050	210	1260	840
80	100	110	22	273	55	328	218
80	100	110	26	164	33	197	131
80	100	150	16	1050	210	1260	840
80	100	150	22	382	76	458	306
80	100	150	26	169	34	209	135
80	100	180	16	700	140	840	560
80	100	180	22	467	93	560	374
80	100	180	26	226	45	271	181
80	160	110	16	700	140	840	560
80	160	110	22	175	35	210	140
80	160	110	26	137	27	164	110
80	160	150	16	336	67	403	269
80	160	150	22	156	31	187	125
80	160	150	26	89	18	107	71
80	160	180	16	411	82	493	329
80	160	180	22	225	45	270	180
80	160	180	26	145	29	174	116

Tabelle 5: Ergebnisse Brennlinsenreflektor (Rohdaten)

4.1.2 Geometrisch korrigierte Ergebnisse mit dem Brennlinsenreflektor (Tabelle)

Die folgende Tabelle (Tab.6) gibt die korrigierten Meßergebnisse mit dem Brennlinsenreflektor nach Berücksichtigung der geometrischen Abschattung wieder. Durch die geometrische Abschattung wird 15% weniger Energie auf die Steine appliziert, deshalb sind um 15% höhere Stoßwellenzahlen zu erwarten. Um diese Messwerte mit den übrigen vergleichen zu können, werden die originalen Meßergebnisse analog der 15%igen geometrischen Abschattung um 15% verringert.

Abstand Reflektor / Wasserbad(mm)	Koppelfläche (mm)	Eff. Abstand (mm)	kV	Stoßwellen	Fehler 20% ± Stoßwellen	Oberer Wert	Unterer Wert
40	100	110	16	1785	357	2142	1428
40	100	110	22	446	89	535	357
40	100	110	26	145	29	174	116
40	100	150	16	1785	357	2142	1428
40	100	150	22	237	47	284	190
40	100	150	26	181	36	217	145
40	100	180	16	1785	357	2142	1428
40	100	180	22	510	102	612	408
40	100	180	26	208	41	249	167

Tabelle 6: Ergebnisse nach geometrischer Korrektur Brennlinsenreflektor

4.2.1 Ergebnisse mit dem Halbellipsoidreflektor (Tabelle)

Die folgende Tabelle (Tab.7) stellt die Ergebnisse der Versuche mit einem Halbellipsoid Reflektor dar.

Abstand Reflektor / Wasserbad(mm)	Koppelfläche (mm)	Eff. Abstand (mm)	kV	Stoßwellen	Fehler 20% ± Stoßwellen	Oberer Wert	Unterer Wert
40	100	110	16	1050	210	1260	840
40	100	110	22	249	50	299	199
40	100	110	26	221	44	265	177
40	100	150	16	700	140	840	560
40	100	150	22	240	48	288	192
40	100	150	26	175	35	210	140
40	100	180	16	470	94	564	376
40	100	180	22	276	55	331	221
40	100	180	26	207	41	248	166
40	160	110	16	1400	280	1680	1120
40	160	110	22	493	99	592	394
40	160	110	26	203	41	244	162
40	160	150	16	599	120	719	479
40	160	150	22	280	56	336	224
40	160	150	26	158	32	190	126
40	160	180	16	700	140	840	560
40	160	180	22	329	66	395	263
40	160	180	26	138	28	166	110
80	100	110	16	2100	420	2520	1680
80	100	110	22	1050	210	1260	840
80	100	110	26	289	58	347	231
80	100	150	16	1400	280	1680	1120
80	100	150	22	470	94	564	376
80	100	150	26	224	45	269	179
80	100	180	16	1400	280	1680	1120
80	100	180	22	1050	210	1260	840
80	100	180	26	293	59	352	234
80	160	110	16	1050	210	1260	840
80	160	110	22	252	50	302	201
80	160	110	26	212	42	254	170
80	160	150	16	840	168	1008	672
80	160	150	22	209	42	251	167
80	160	150	26	118	24	142	94
80	160	180	16	840	168	1008	672
80	160	180	22	247	49	296	198
80	160	180	26	178	36	214	142

Tabelle 7: Ergebnisse Halbellipsoidreflektor (Rohdaten)

4.2.2 Geometrisch korrigierte Ergebnisse mit dem Halbellipsoidreflektor (Tabelle)

Die folgende Tabelle (Tab.8) gibt die korrigierten Meßergebnisse mit dem Brennlinsenreflektor nach Berücksichtigung der geometrischen Abschattung wieder. Durch die geometrische Abschattung wird 15% weniger Energie auf die Steine appliziert, deshalb sind um 15% höhere Stoßwellenzahlen zu erwarten. Um diese Messwerte mit den übrigen vergleichen zu können, werden die originalen Meßergebnisse analog der 15%igen geometrischen Abschattung um 15% verringert.

Abstand Reflektor / Wasserbad(mm)	Koppelfläche (mm)	Eff. Abstand (mm)	kV	Stoßwellen	Fehler 20% ± Stoßwellen	Oberer Wert	Unterer Wert
40	100	110	16	892	178	1070	714
40	100	110	22	211	42	253	169
40	100	110	26	188	38	226	150
40	100	150	16	595	119	714	476
40	100	150	22	204	40	244	164
40	100	150	26	149	30	179	119
40	100	180	16	400	80	480	320
40	100	180	22	234	47	281	187
40	100	180	26	178	36	214	142

Tabelle 8: Ergebnisse nach geometrischer Korrektur Halbellipsoidreflektor

4.3 Graphische Darstellungen

Wie bereits oben ausgeführt werden im folgenden jeweils die vier Parameter (Effektiver Abstand Reflektor - Stein, Koppelabstand, Koppelfläche und Stoßwellenenergie / Generatorspannung kV) als Variable bei ansonsten konstanten übrigen Bedingungen dargestellt (Abb. 44 – 67). Als Ordinate dient dabei jeweils die Stoßwellenanzahl. Da bei 25% der Werte eine geometrische Abschattung der Stoßwellenenergie stattfindet, sind die angepassten Stoßwellenwerte in den jeweiligen Graphiken mit dargestellt worden.

Die Parameter Koppelabstand und Koppelfläche können zusammen als schallweiche Blende in einem Strahlengang betrachtet werden. Dies wird in einer eigenen Serie von Graphiken dargestellt (Abstand Koppelfläche 40 und 80 mm sowie Koppelfläche 100 und 160 mm bei identischem effektiven Abstand und gleicher Generatorspannung je Reflektortyp) (Abb. 68-76).

Die Erwartung ist, dass wenn die schallweiche Blende außerhalb, resp. knapp (15% Abschattung bei 18 von 72 Meßpunkten) innerhalb des geometrischen Strahlengangs liegt, sie keinen oder nur geringen Einfluss auf die Zertrümmerungsleistung hat. Also sollten die vier (fünf bei den entsprechenden Meßpunkten) dargestellten Ergebnisse nur innerhalb eines engen Bereichs differieren. Deshalb sind die rechnerischen Fehlerbereiche in diese Grafiken integriert.

4.3.1 Effektiver Abstand Reflektor – Stein

In der ersten Darstellung wird der Effekt der Eindringtiefe bei konstanter Koppelfläche und konstantem Abstand Reflektor - Wasserbad und Generatorspannung bei beiden Reflektortypen dargestellt. Dies spiegelt die klinische Situation unterschiedlicher Steintiefen (ventraler / dorsaler Kelchstein) bei ansonsten konstanten Bedingungen wieder. Es werden beispielhaft folgende Parametergruppen dargestellt:

Koppelfläche 100 mm, Koppelabstand 40 mm, Energiestufe 26 kV (Abb. 40)

Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 40 mm, Energiestufe 22 kV (Abb. 41)

Koppelfläche 100 mm, Koppelabstand 80 mm, Energiestufe 26 kV (Abb. 42)

Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 80 mm, Energiestufe 22 kV (Abb. 43)

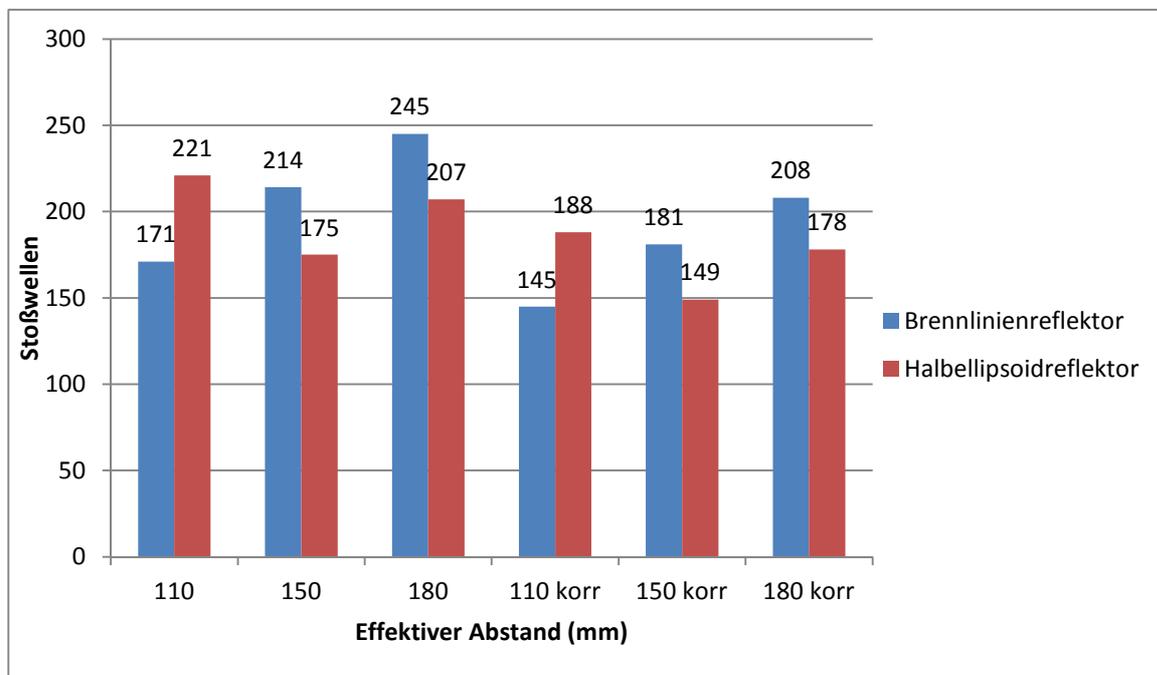


Abbildung 40: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Koppelabstand 40 mm, Energiestufe: 26 kV, hier geometrische Abschattung (ca. 15%) Rohwerte und korrigierte Werte nebeneinander

Bei kleiner Koppelfläche und niedrigem Koppelabstand, klinisch einem zierlichen Patienten mit tiefem (ventralem Kelchstein oder hohem Harnleiter) Steinsitz entsprechend finden sich folgende Ergebnisse: Die Fragmentationsleistung des Brennlinienreflektor sinkt von 110 über 150 nach 180mm ab, der Halbellipsoidreflektor zeigt im F2 Areal die höchste Fragmentationsleistung.

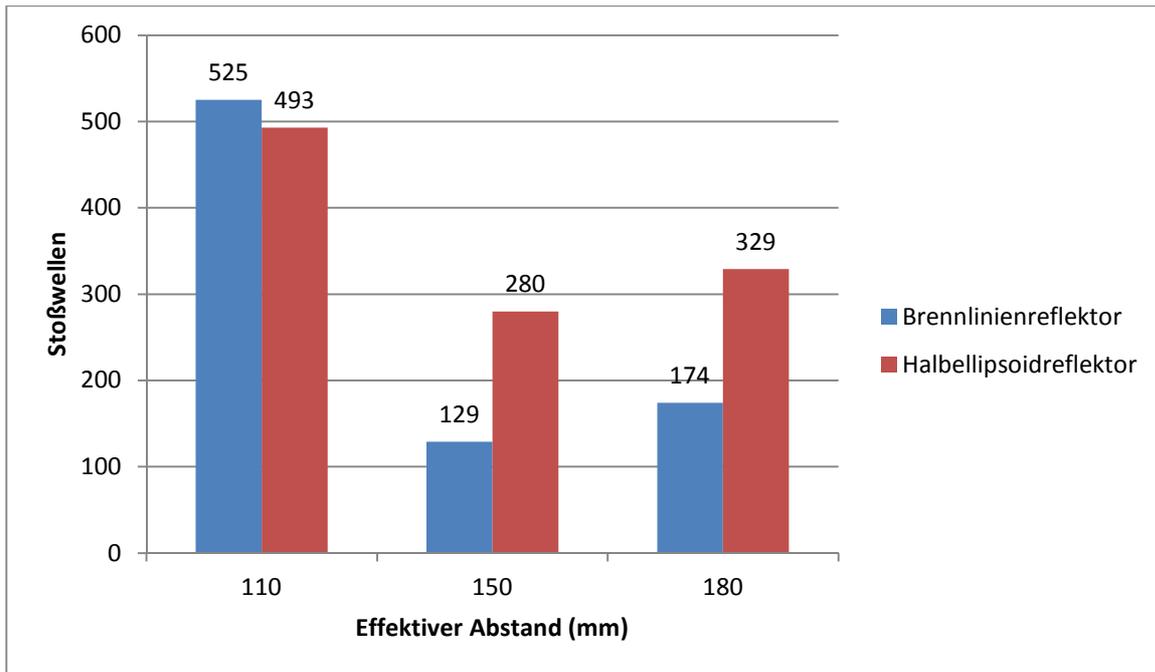


Abbildung 41: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 40 mm, Energiestufe: 22 kV

Bei großer Koppelfläche und niedrigem Koppelabstand, klinisch einem pyknischen Patienten mit tiefem (ventralem Kelchstein oder hohem Harnleiter) Steinsitz entsprechend finden sich folgende Ergebnisse: Hier finden sich bei mittlerer Energie bei beiden Reflektoren die höchste Fragmentationsleistung im Bereich 150mm, wobei der Effekt bei dem Halbellipsoidreflektor entgegen der Erwartung nicht so ausgeprägt ist.

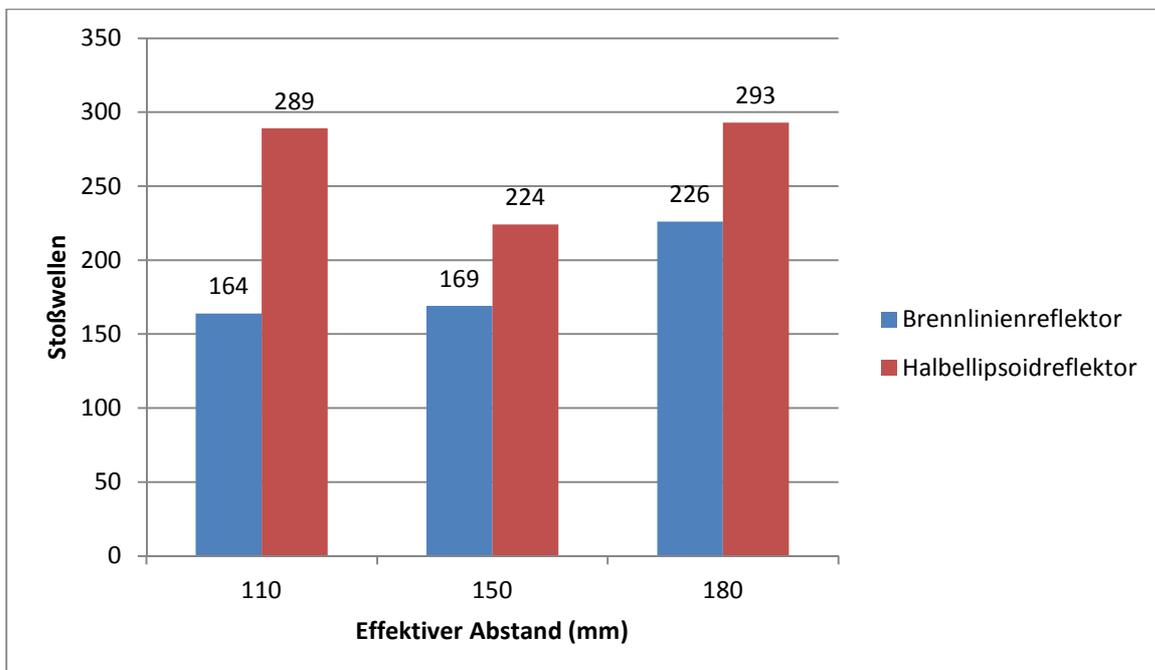


Abbildung 42: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Koppelabstand 80 mm, Energiestufe: 26 kV

Bei kleiner Koppelfläche und hohem Koppelabstand, klinisch einem schlanken Patienten mit oberflächlichem (dorsalem Kelchstein) Steinsitz entsprechend, finden sich bei hoher Energie folgende Ergebnisse: Der Halbellipsoidreflektor zeigt das erwartete Wirkungsmaximum fokusnah, beim Brennlinsenreflektor sinkt die Fragmentationsleistung entlang der Brennlinie ab.

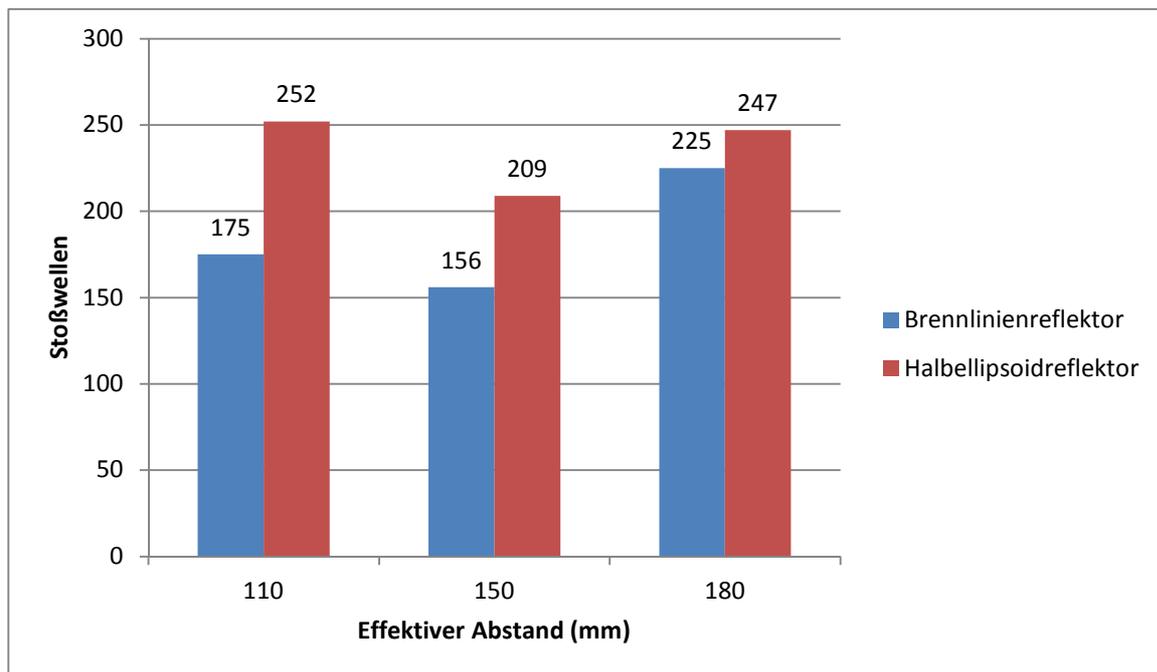


Abbildung 43: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 80 mm, Energiestufe: 22kV

Bei großer Koppelfläche und hohem Koppelabstand, klinisch einem pyknischen Patienten mit oberflächlichem (dorsalem Kelchstein) Steinsitz entsprechend, finden sich bei mittlerer Energie folgende Ergebnisse: Der Halbellipsoidreflektor zeigt das erwartete Verhalten, Maximum der Fragmentation bei 150mm, der Brennlinsenreflektor zeigt ein ähnliches Verhalten wobei die Leistung nach hinten deutlicher abfällt.

4.3.2. Koppelabstand (Abstand Reflektor – Wasserbad)

In der zweiten Darstellung wird der Einfluss des Koppelabstandes auf die Zertrümmerungsleistung bei konstanter Koppelfläche, Eindringtiefe und Generatorspannung bei beiden Reflektortypen dargestellt.

Es werden beispielhaft folgende Parametergruppen dargestellt:

Koppelfläche 100 mm, Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe 22 kV (Abb. 44)

Koppelfläche 100 mm, Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe 26 kV (Abb. 45)

Koppelfläche 100 mm, Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe 22 kV (Abb. 46)

Koppelfläche 160 mm, Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe 26 kV (Abb. 47)

Koppelfläche 160 mm, Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe 22 kV (Abb. 48)

Koppelfläche 160 mm, Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe 26 kV (Abb. 49)

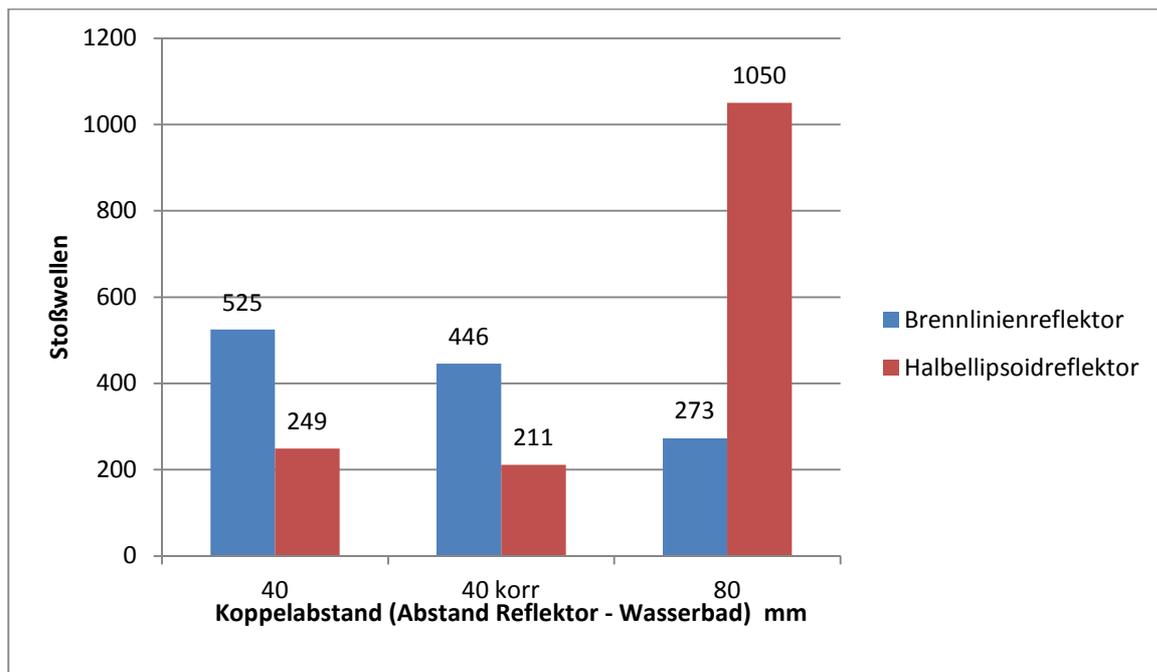


Abbildung 44: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Effektiver Abstand 110 mm, 22 kV, hier geometrische Abschattung bei Koppelabstand 40 mm

Obwohl der Abstand Stein / Reflektor gleich ist, die Stoßwellenenergie gleich (mittelhoch) ist und eine geometrische Abschattung (korrigiert und unkorrigiert) stattfindet, ist die Zertrümmerungsleistung hier deutlich unterschiedlich. Bei mittlerer Energie zeigt der Halbellipsoidreflektor bei hohem Koppelabstand, der Brennlinienreflektor bei niedrigem Koppelabstand einen Wirkungsverlust.

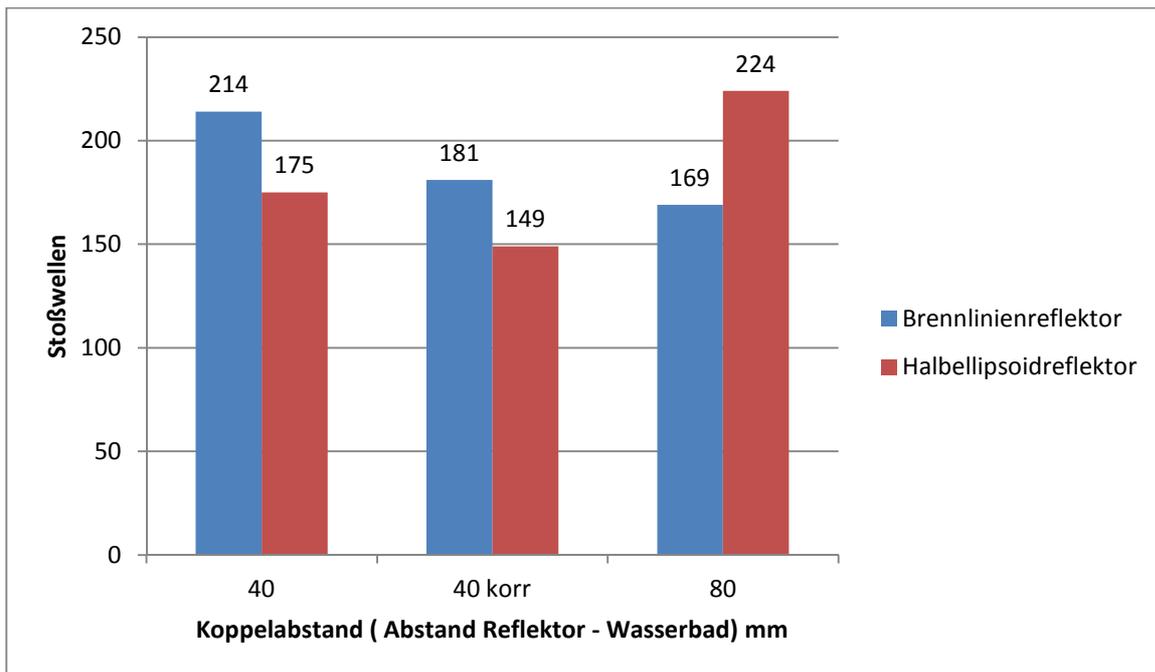


Abbildung 45: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Effektiver Abstand 150 mm, 26 kV, hier geometrische Abschattung bei Koppelabstand 40 mm

Bei hoher Energie zeigt der Halbellipsoidreflektor bei hohem Koppelabstand, der Brennlinienreflektor bei niedrigem Koppelabstand einen Wirkungsverlust.

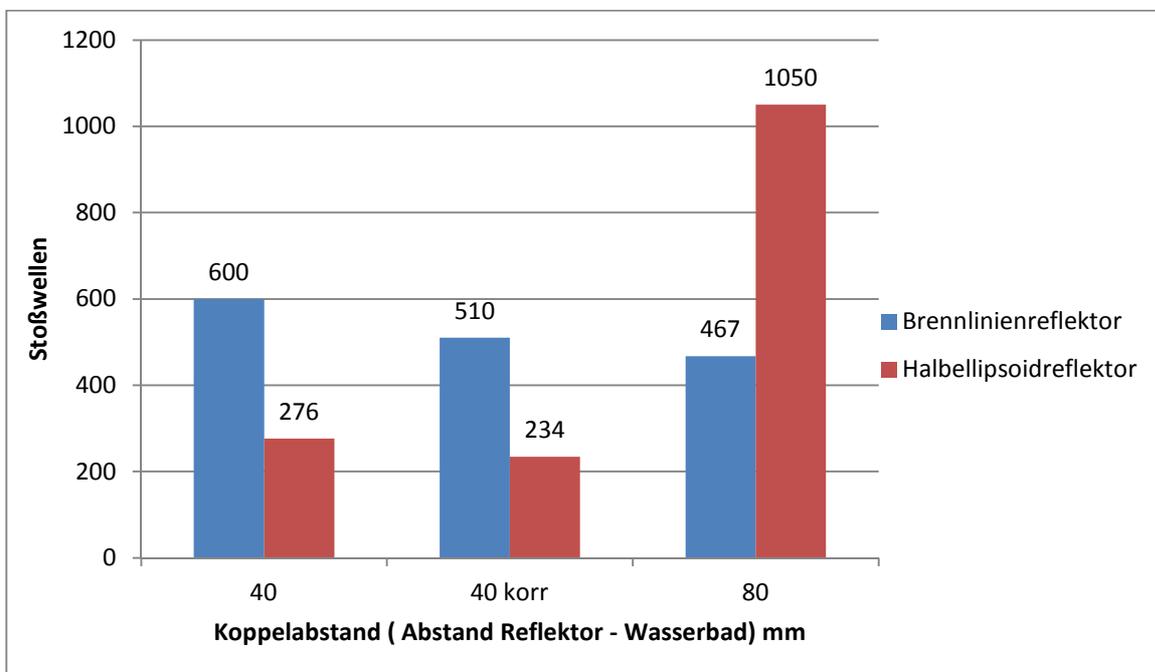


Abbildung 46: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Effektiver Abstand 180 mm, 22 kV, hier geometrische Abschattung bei Koppelabstand 40 mm

Bei dem niedrigen Koppelabstand findet eine geometrische Abschattung statt. Auch hier zeigt bei mittlerer Energie der Halbellipsoidreflektor bei hohem Koppelabstand, der Brennlinsenreflektor bei niedrigem Koppelabstand einen Wirkungsverlust.

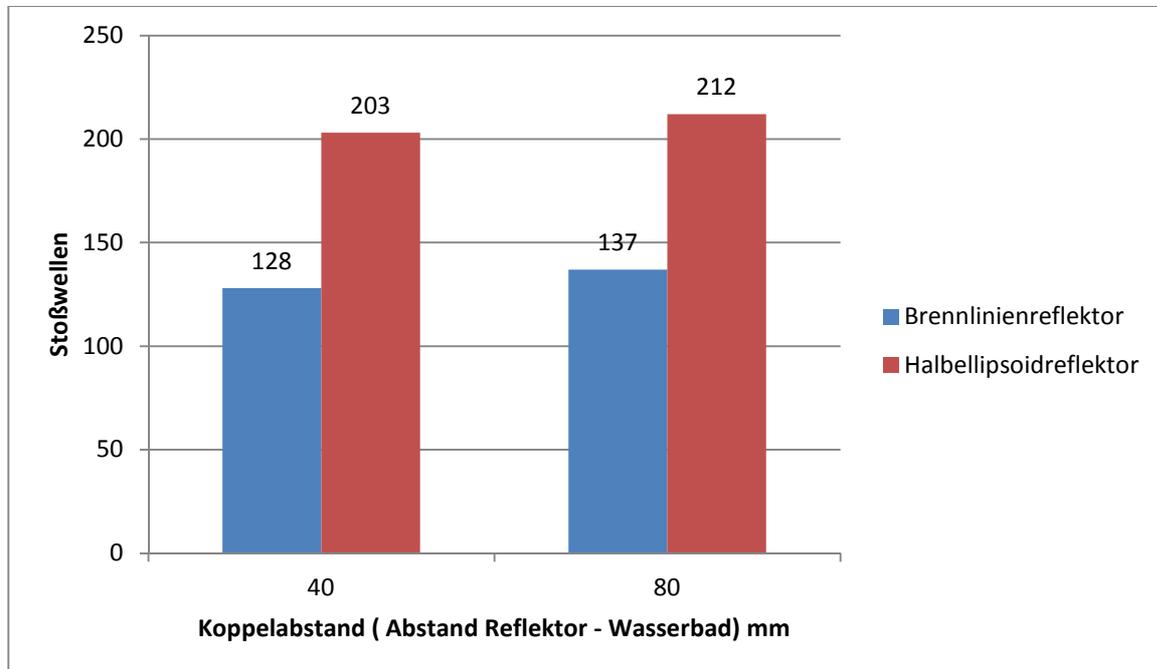


Abbildung 47: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Effektiver Abstand 110 mm, 26 kV

Bei hoher Energie zeigt der Halbellipsoidreflektor bei hohem Koppelabstand, als auch der Brennlinsenreflektor jeweils einen geringen Wirkungsverlust.

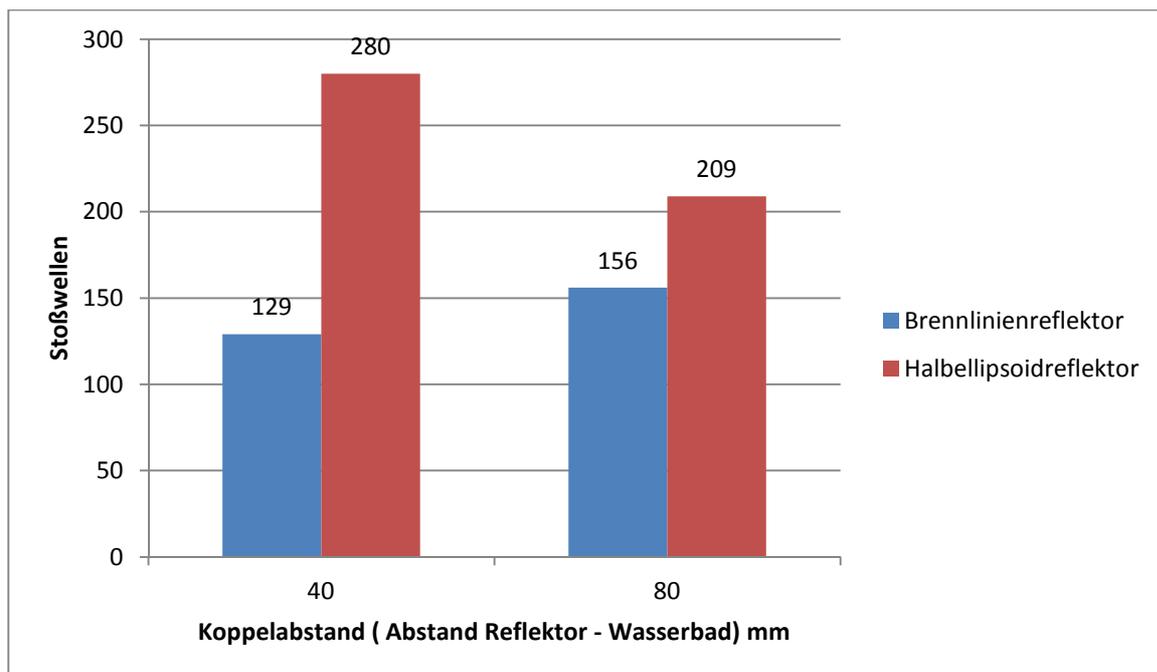


Abbildung 48: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Effektiver Abstand 150 mm, 22 kV

Bei mittlerer Energie zeigt der Halbellipsoidreflektor bei niedrigem Koppelabstand, der Brennlinienreflektor bei hohem Koppelabstand einen Wirkungsverlust.

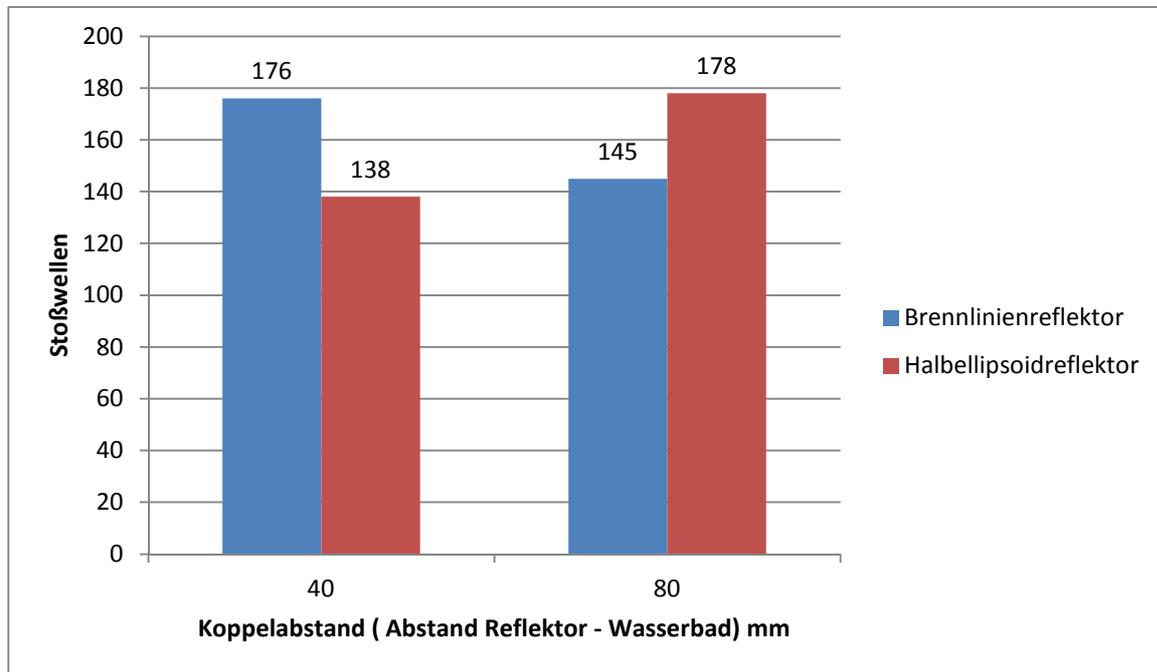


Abbildung 49: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Effektiver Abstand 180 mm, 26 kV

Bei hoher Energie zeigt der Halbellipsoidreflektor bei hohem Koppelabstand, der Brennlinienreflektor bei niedrigem Koppelabstand einen Wirkungsverlust.

4.3.3 Koppelfläche

In der dritten Darstellung wird der Einfluss der Koppelfläche (100 mm / 160 mm Durchmesser) auf die Fragmentationsleistung bei konstanter Eindringtiefe, Abstand Reflektor / Wasserbad und Generatorspannung bei beiden Reflektortypen dargestellt. Dies entspricht der klinischen Situation schlanker / adipöser Patient bei identischer Steinlage, dem adipösen Patienten entsprechend Koppelabstand 40mm, dem dünnen Patienten Koppelabstand 80 mm. Es werden beispielhaft folgende Parametergruppen dargestellt:

Koppelabstand 40 mm, Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe 26 kV (Abb. 50)

Koppelabstand 40 mm, Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe 22 kV (Abb. 51)

Koppelabstand 40 mm, Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe 26 kV (Abb. 52)

Koppelabstand 80 mm, Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe 22 kV (Abb. 53)

Koppelabstand 80 mm, Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe 26 kV (Abb. 54)

Koppelabstand 80 mm, Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe 22 kV (Abb. 55)

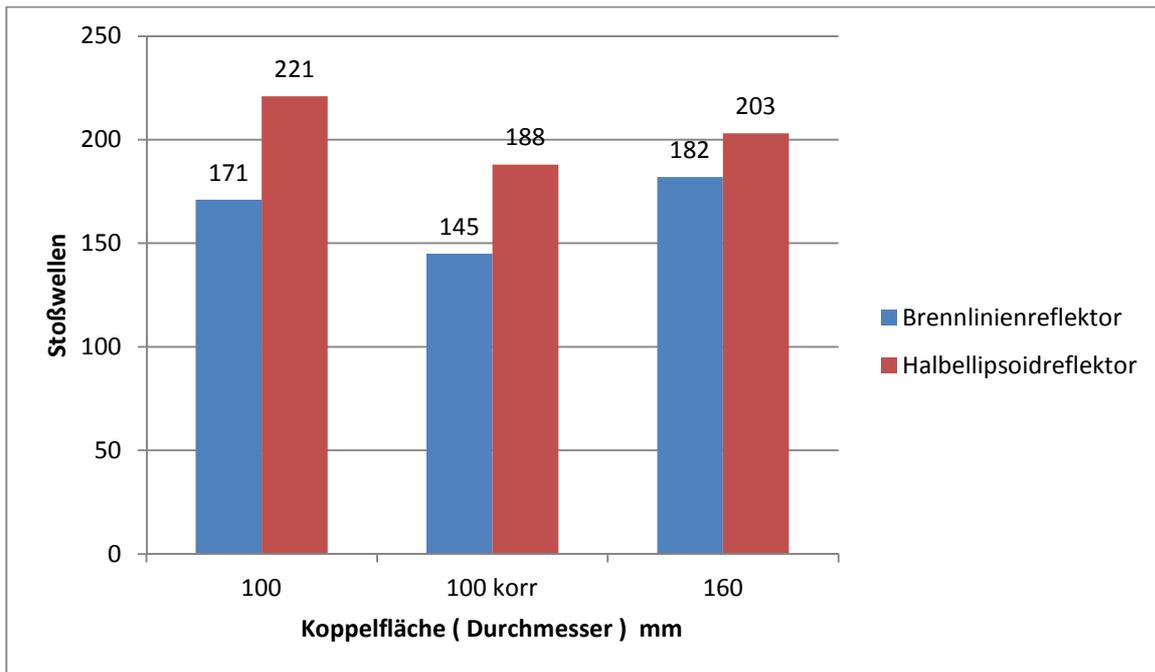


Abbildung 50: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Effektiver Abstand 110 mm, 26 kV, hier geometrische Abschattung (ca. 15%) bei Koppelfläche (Durchmesser) 100 mm

Bei kleiner Koppelfläche und hoher Energie ist der Brennlinienreflektor effektiver als bei großer Koppelfläche, der Halbellipsoidreflektor ist bei großer Koppelfläche effektiver.

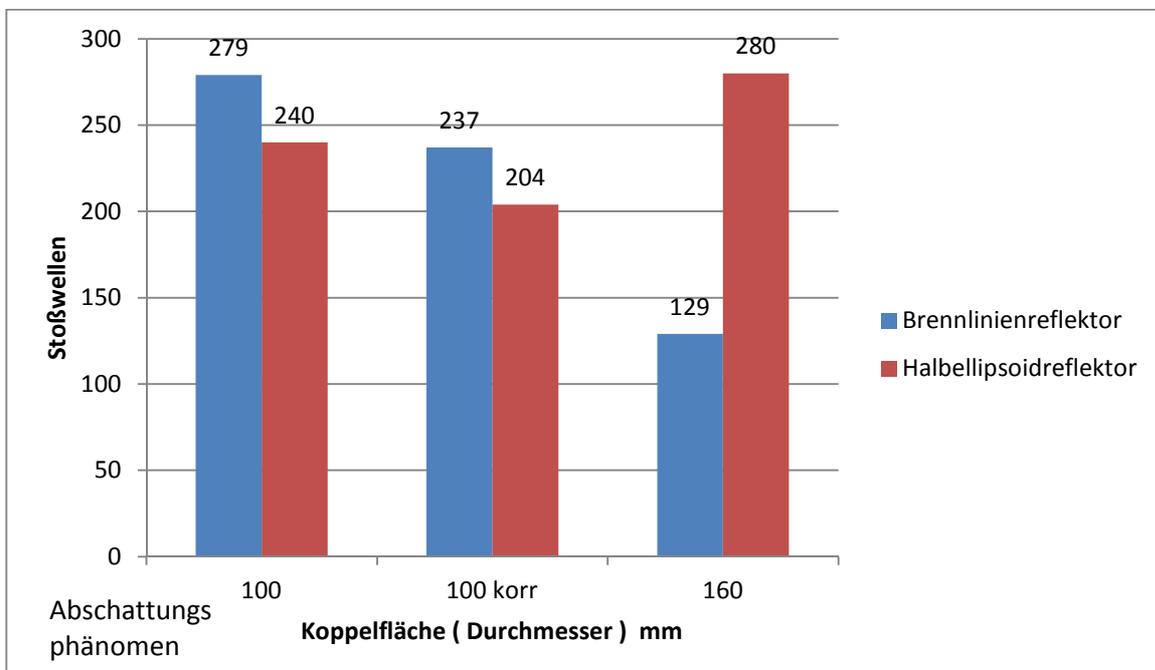


Abbildung 51: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 22 kV, hier geometrische Abschattung (ca. 15%) bei Koppelfläche (Durchmesser) 100 mm

Bei großer Koppelfläche und mittlerer Energie ist der Brennlinsenreflektor effektiver als bei kleiner Koppelfläche, der Halbellipsoidreflektor ist bei kleiner Koppelfläche effektiver.

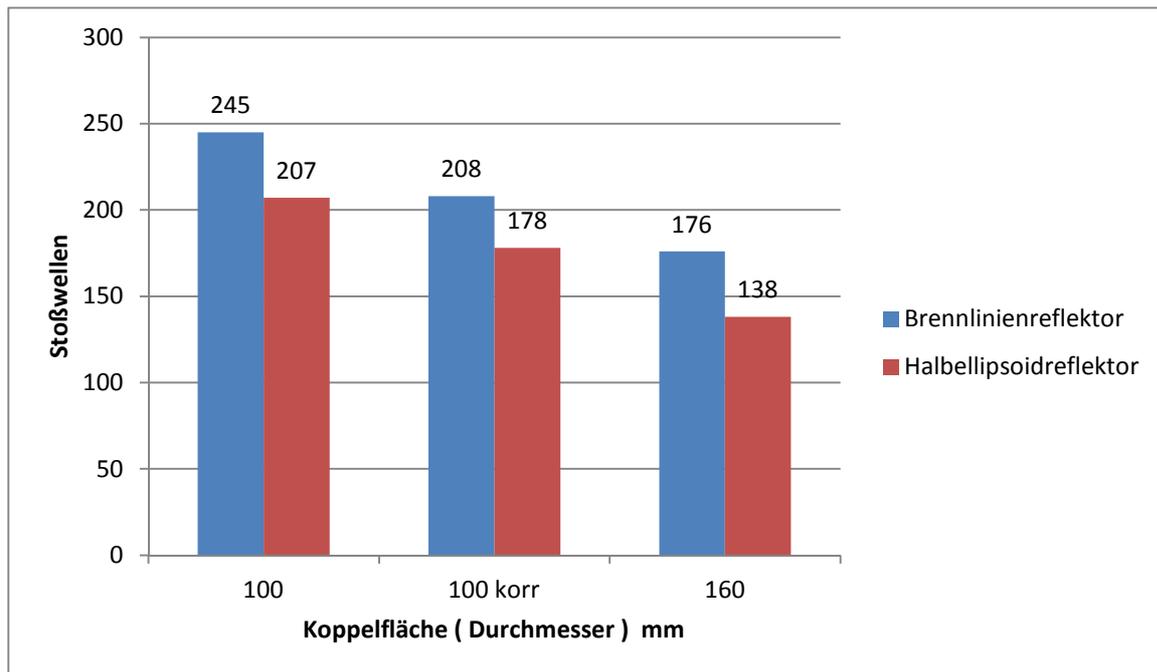


Abbildung 52: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 26 kV, hier geometrische Abschattung (ca. 15%) bei Koppelfläche (Durchmesser) 100 mm

Hier sind beide Reflektoren bei großer Koppelfläche und hoher Energie effektiver.

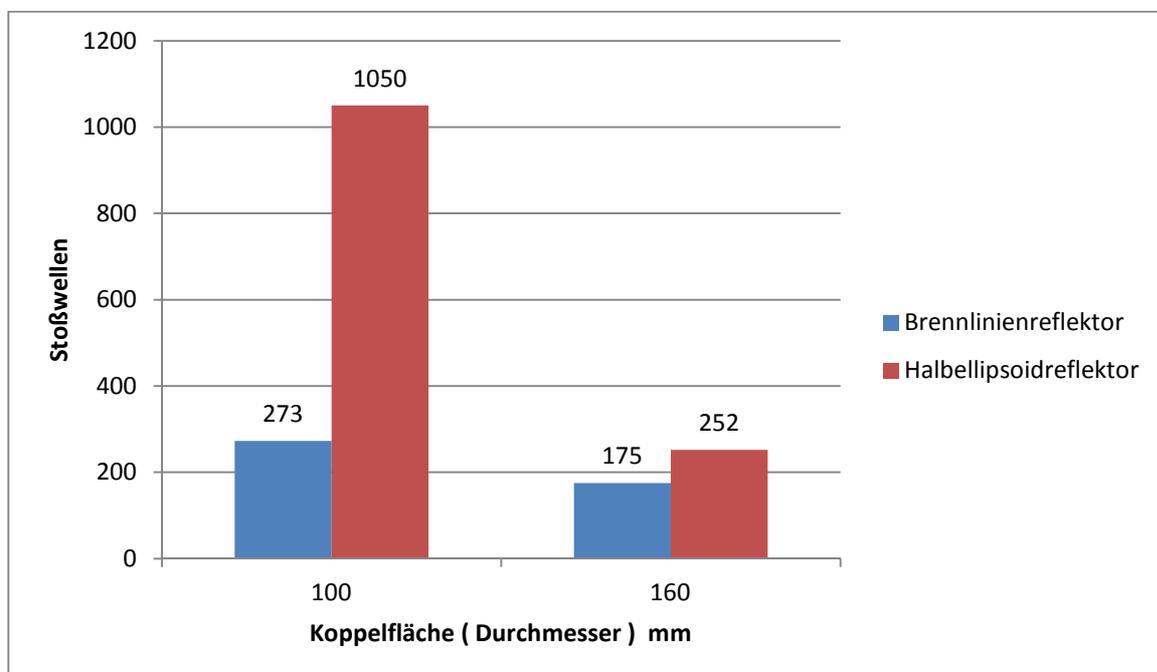


Abbildung 53: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe: 22 kV

Hier sind beide Reflektoren bei großer Koppelfläche und mittlerer Energie effektiver, wobei der Effekt bei dem Halbellipsoidreflektor wesentlich ausgeprägter ist.

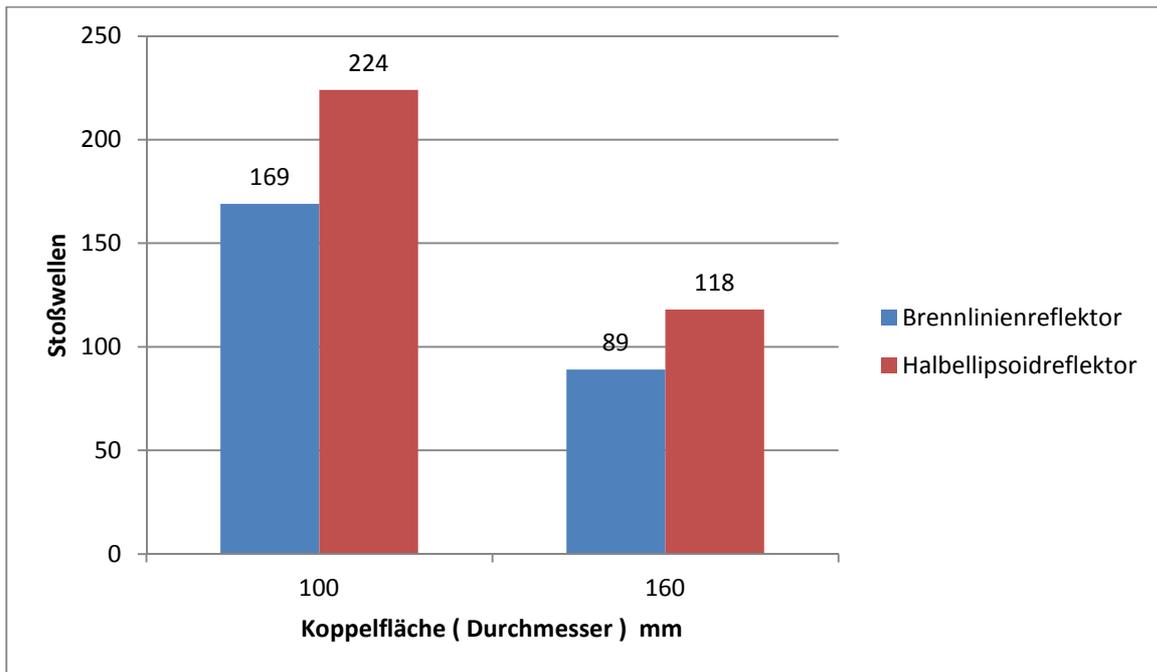


Abbildung 54: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 26 kV

Hier sind beide Reflektoren bei großer Koppelfläche und hoher Energie effektiver

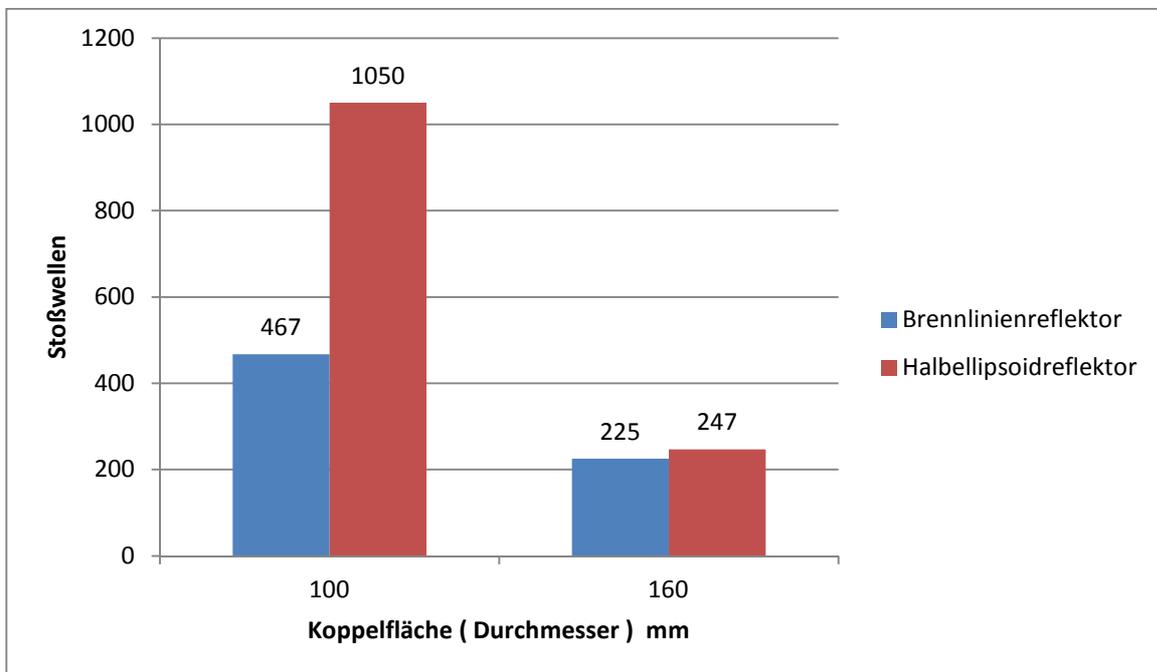


Abbildung 55: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 22 kV

Hier sind beide Reflektoren bei großer Koppelfläche und mittlerer Energie effektiver.

4.3.4 Stoßwellenenergie / Generatorspannung kV

In der vierten Darstellung wird der Einfluss der Stoßwellenenergie / Generatorspannung auf die Zertrümmerungsleistung bei konstanter Koppelfläche, konstantem Koppelabstand (Abstand Reflektor – Wasserbad) und Eindringtiefe bei beiden Reflektortypen dargestellt. In allen Graphiken zeigt sich dasselbe Bild, mit zunehmender Generatorspannung steigt die Zertrümmerungsleistung an. Da die Betrachtung der folgenden Parametergruppen für die Plausibilitätsbewertung des Datenkollektivs verwendet wird (siehe 5.1.1.2), werden sie hier komplett graphisch dargestellt (Abb. 56 – 67).

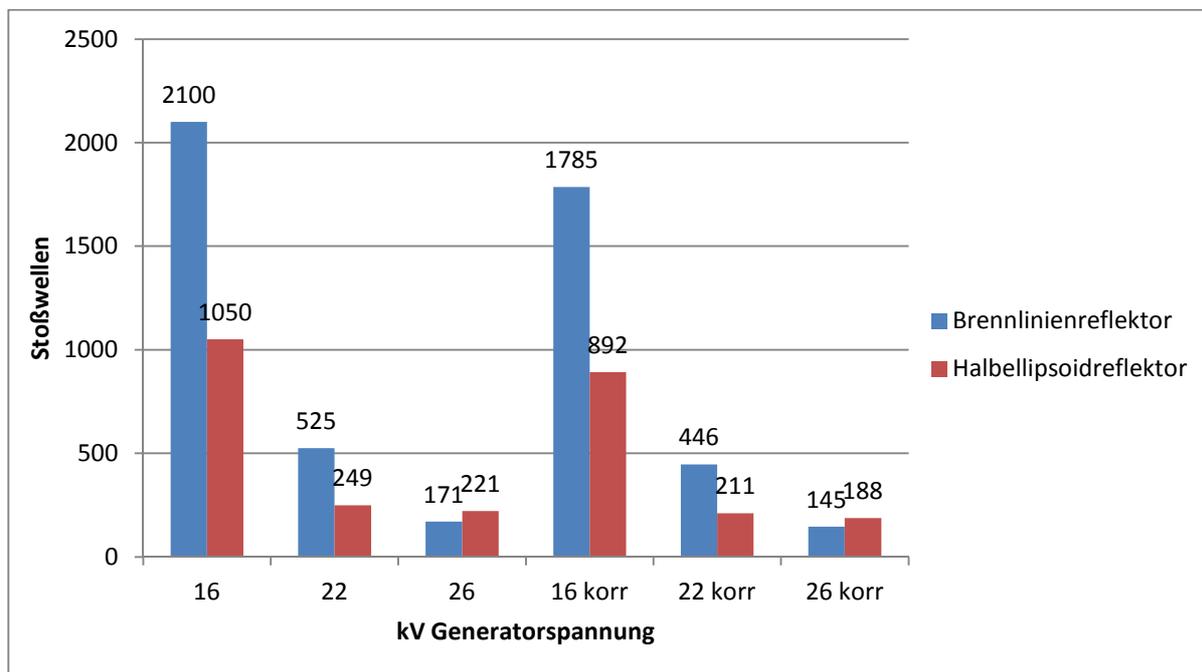


Abbildung 56: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 110, geometrische Abschattung (15%) bei allen Meßpunkten

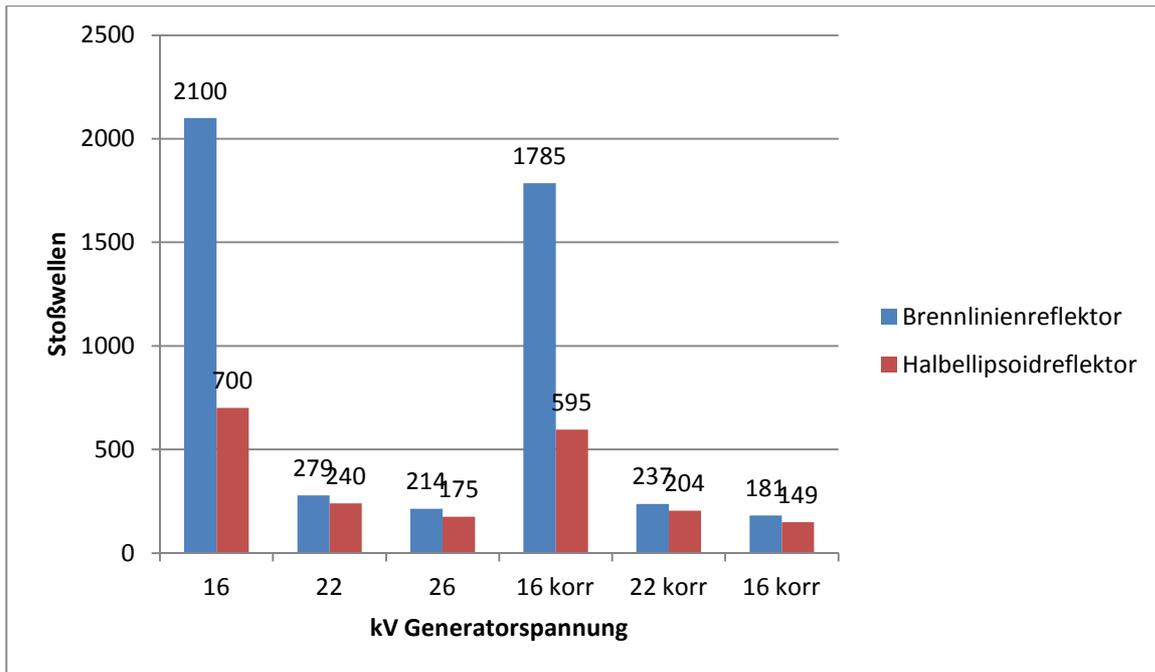


Abbildung 57: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 150, geometrische Abschattung (15%) bei allen Meßpunkten.

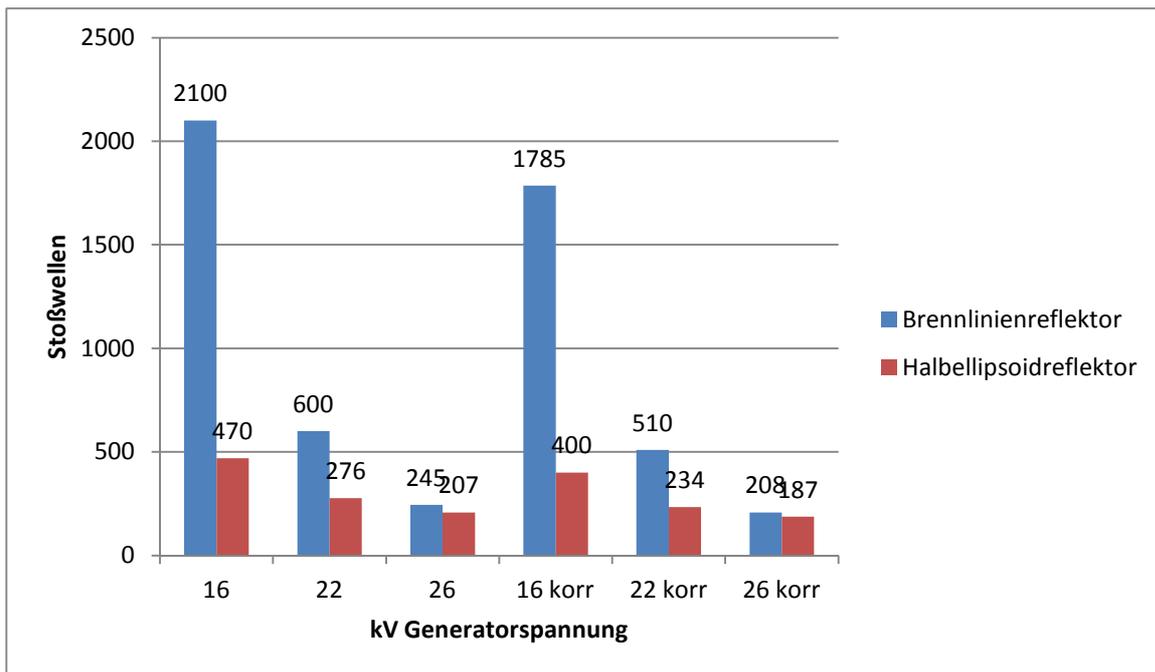


Abbildung 58: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 180, geometrische Abschattung (15%) bei allen Meßpunkten.

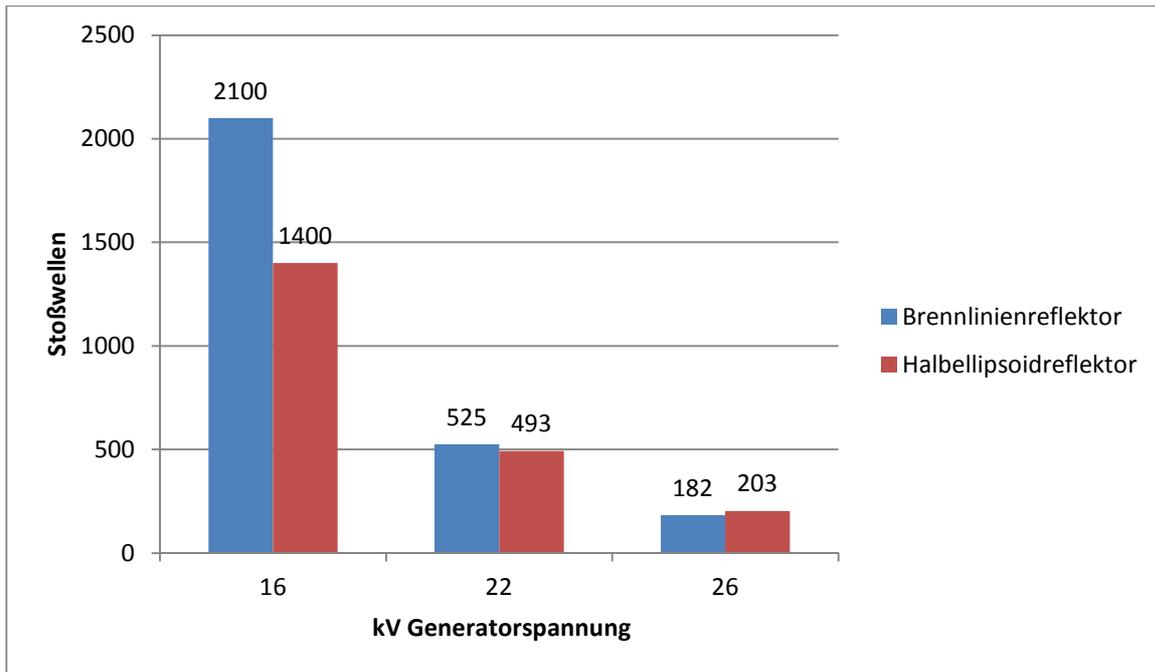


Abbildung 59: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 110

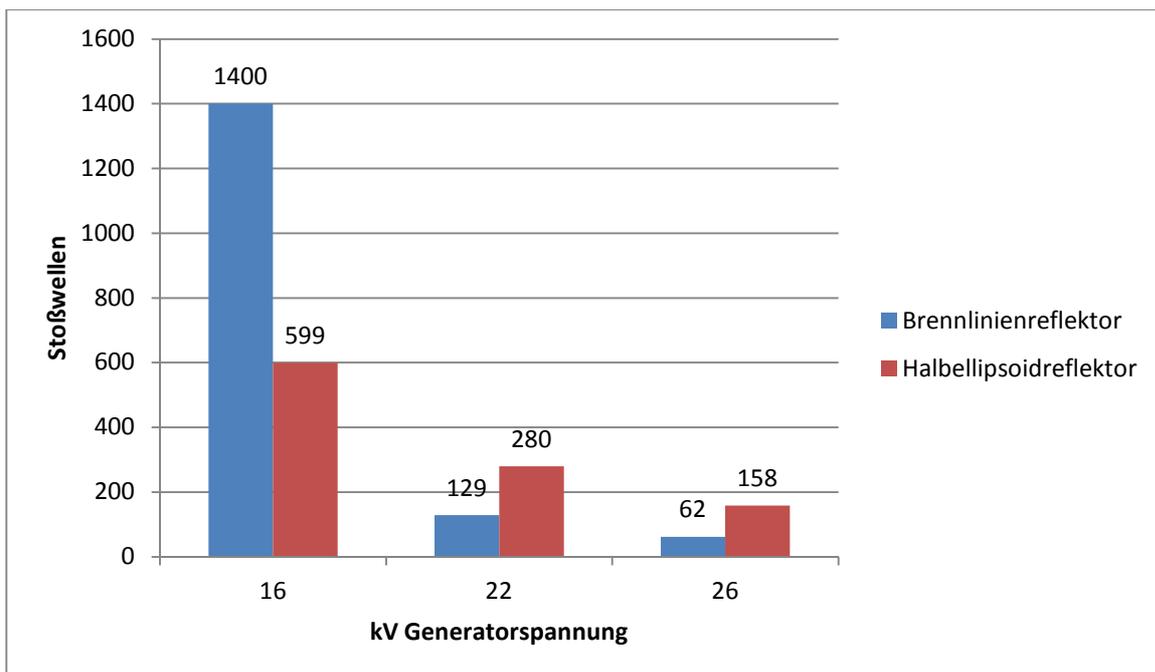


Abbildung 60: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 150

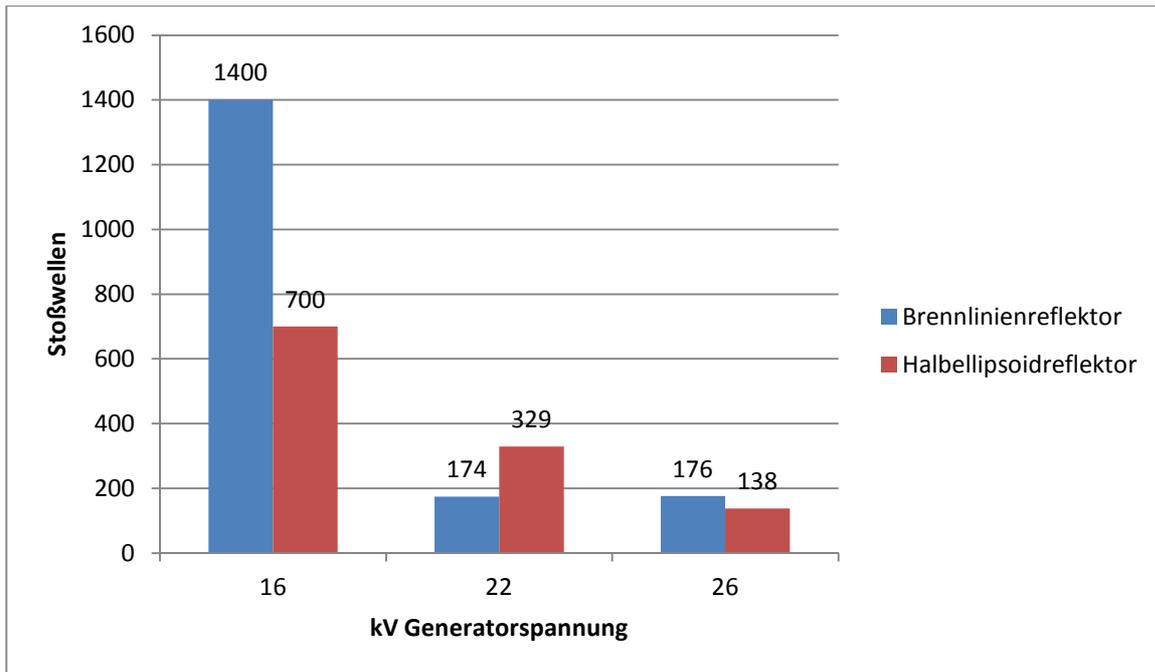


Abbildung 61: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 180

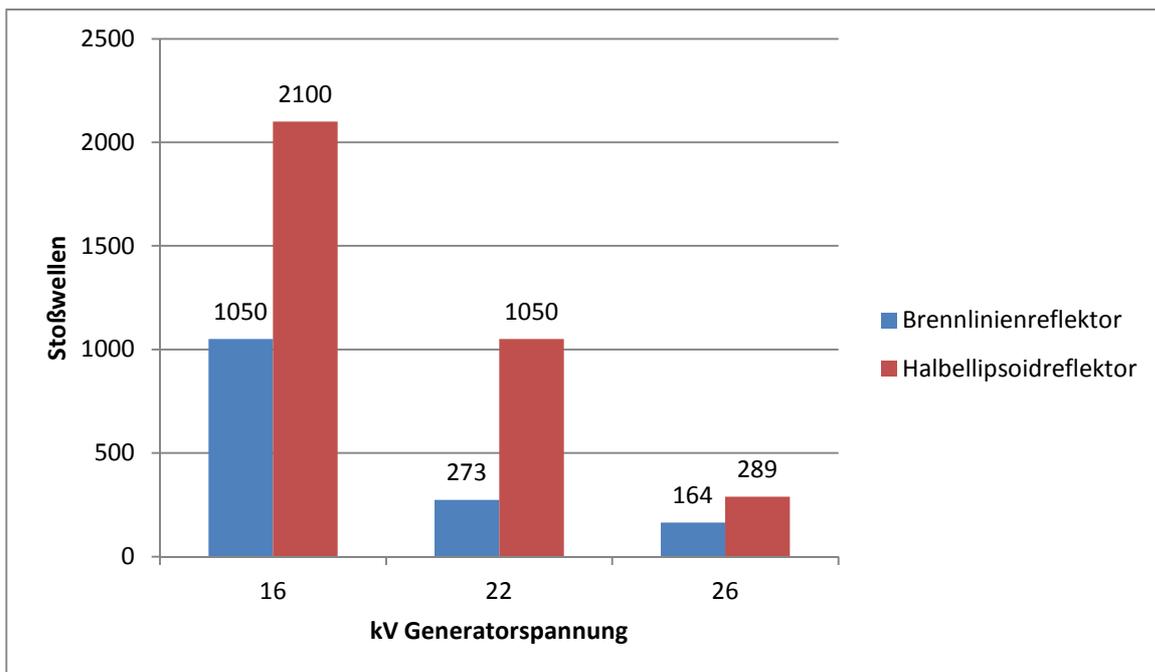


Abbildung 62: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 110

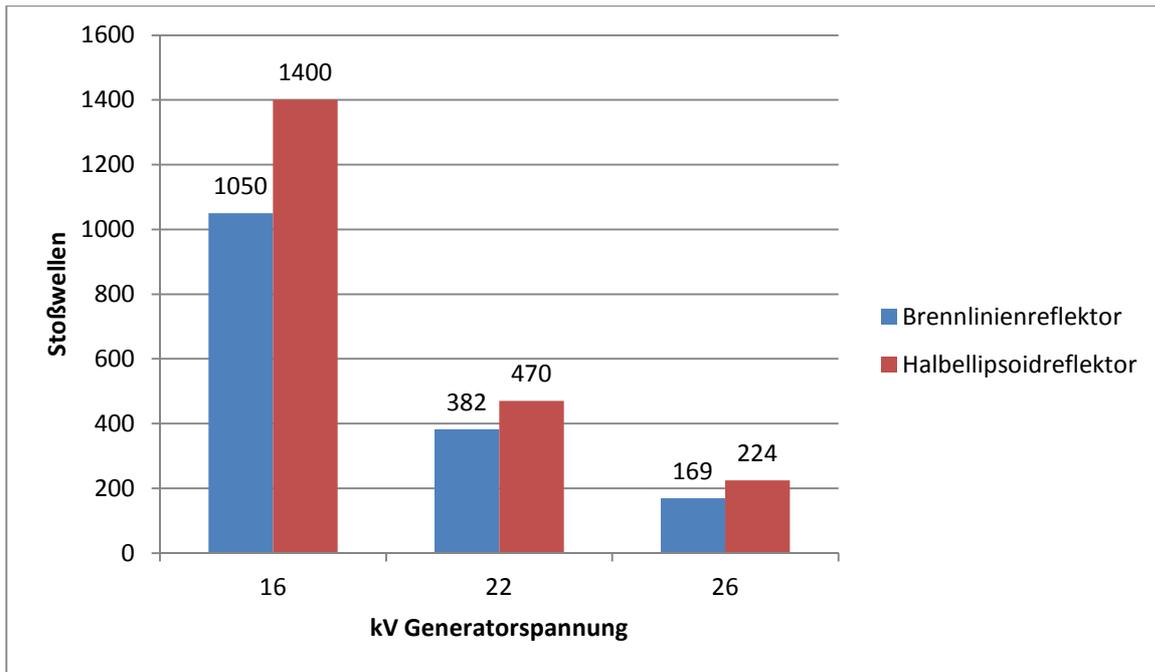


Abbildung 63: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 150

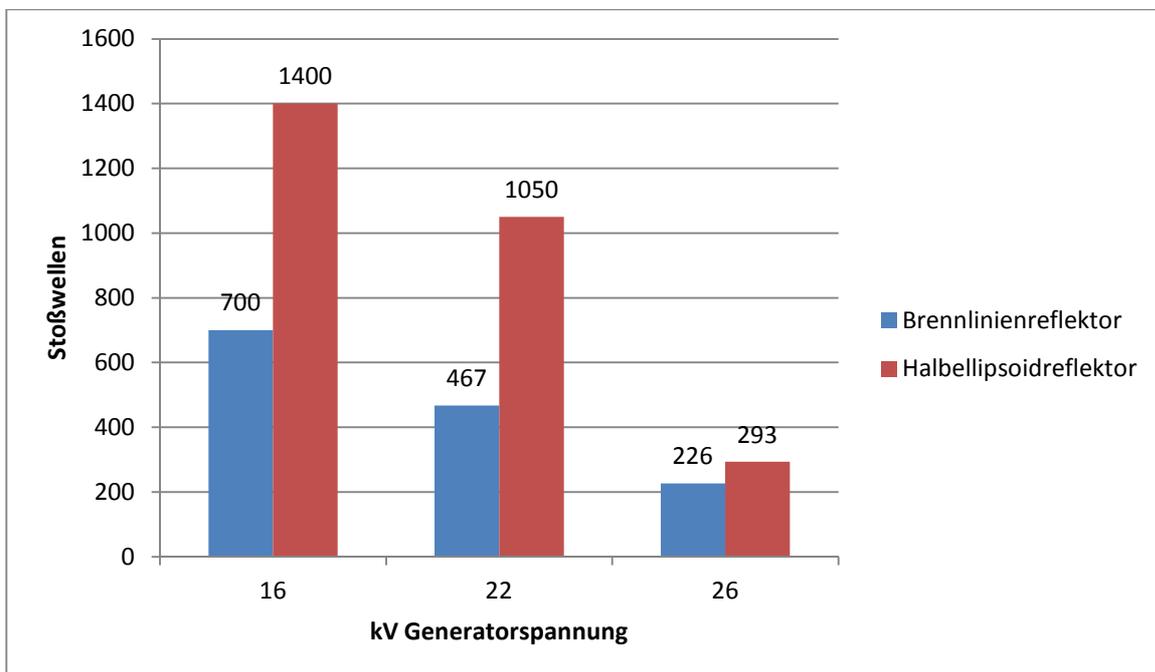


Abbildung 64: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 180

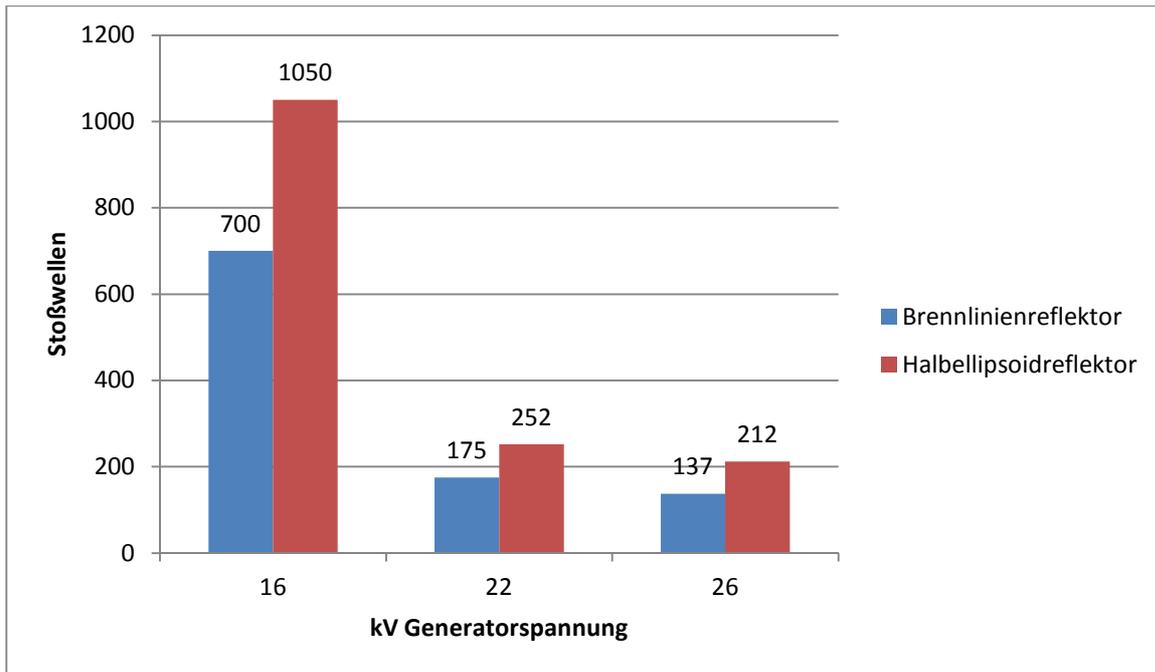


Abbildung 65: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 110

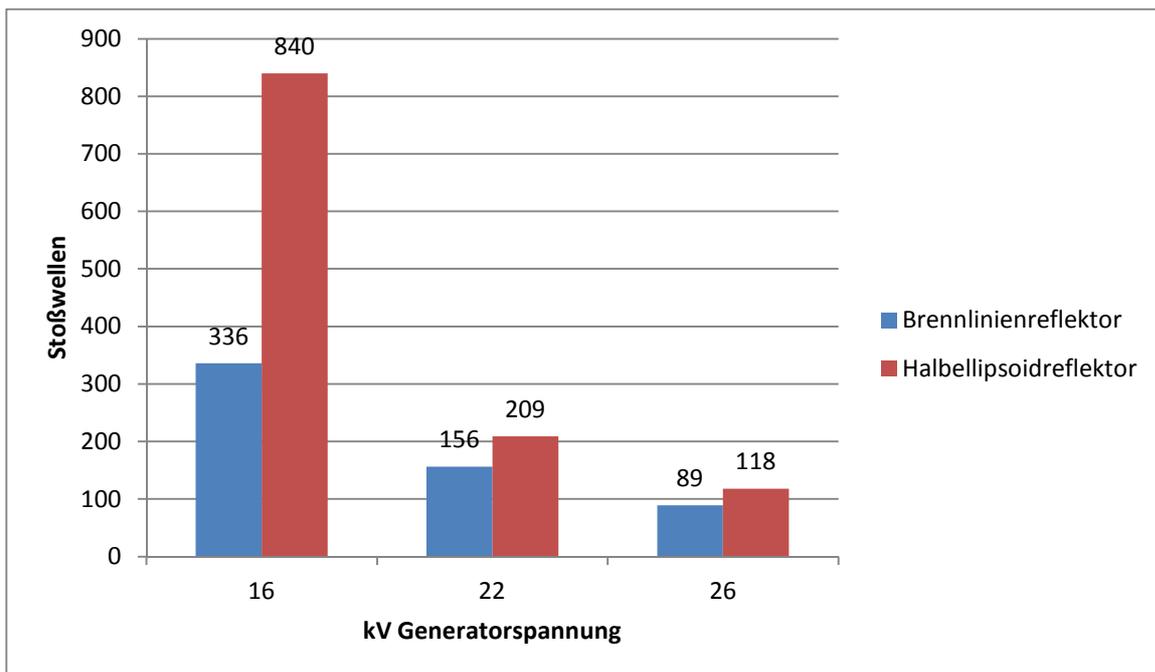


Abbildung 66: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 150

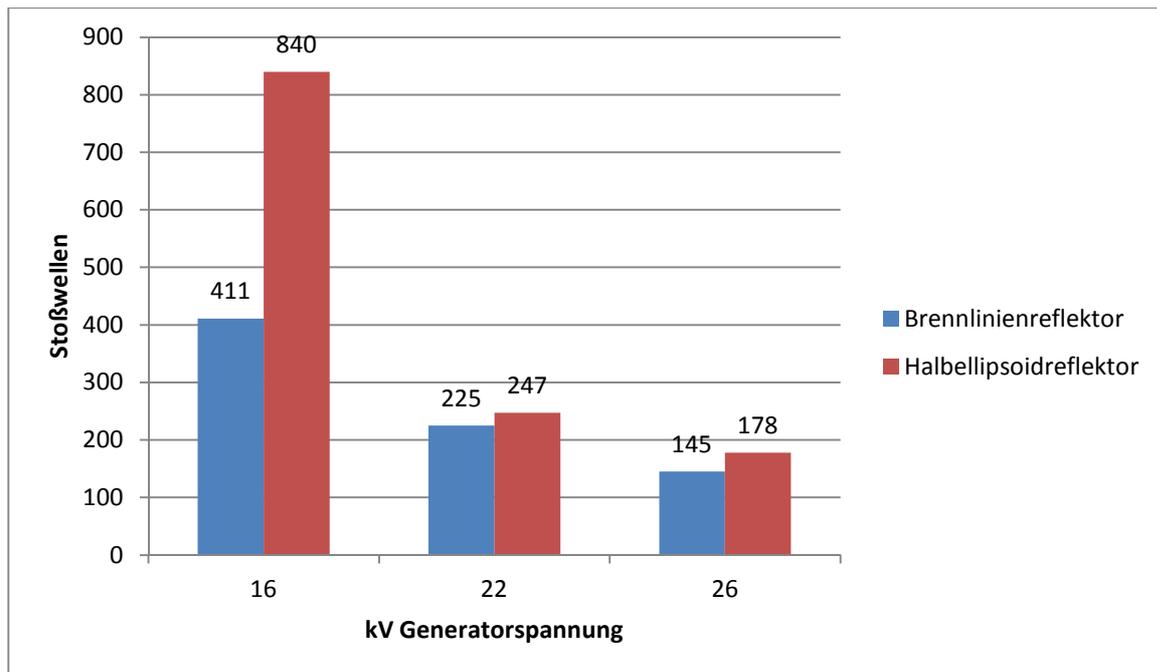


Abbildung 67: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 180

4.3.5. Blendeneffekt

In den folgenden Graphiken werden bei jeweils konstantem effektiven Abstand und konstanter Stoßwellenenergie / Generatorspannung die Auswirkungen der Kombinationen von Koppelabstand und Koppelfläche, die als schallweiche Blende aufgefasst werden können, auf die Stoßwellenanzahl dargestellt (Abb. 68 – 76).

Wenn die schallweiche Blende außerhalb, resp. knapp (15% Abschattung bei 18 von 72 Meßpunkten) innerhalb des geometrischen Strahlengangs liegend, keinen oder nur geringen Einfluss auf die Zertrümmerungsleistung hat, so sollten die vier dargestellten Ergebnisse nur innerhalb eines engen Bereichs differieren.

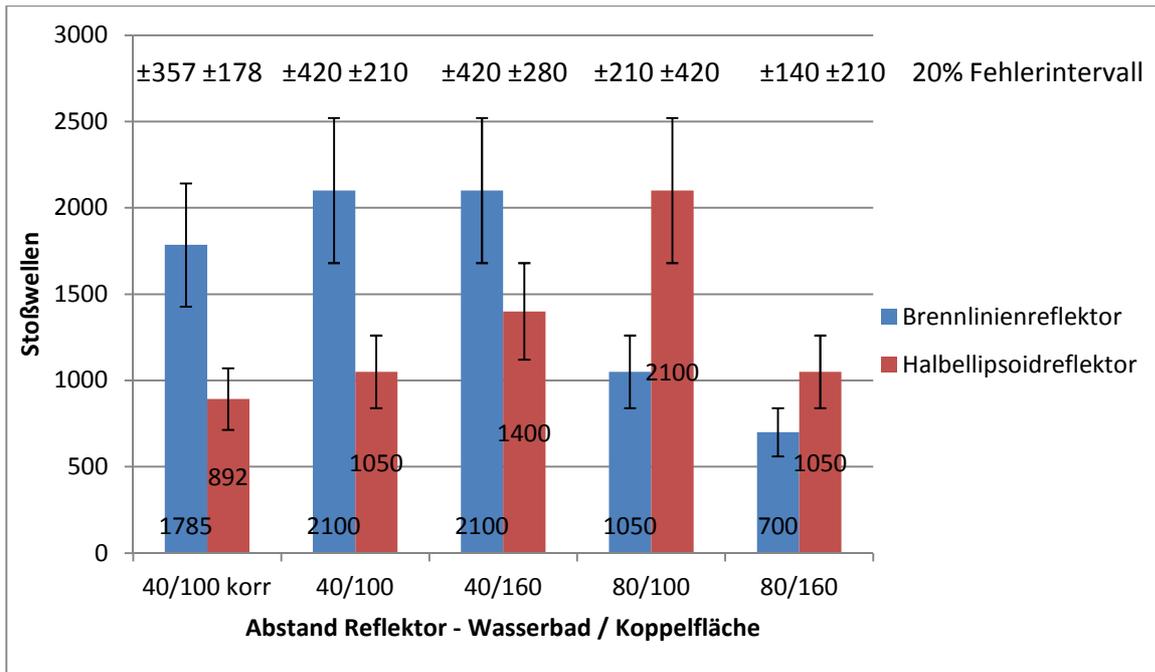


Abbildung 68: Graphik: Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe: 16 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung

Die Maximal- und Minimalwerte der Stoßwellenanzahlen differieren bei dem Brennlinienreflektor um den Faktor 3, bei dem Halbellipsoidreflektor um den Faktor 2.

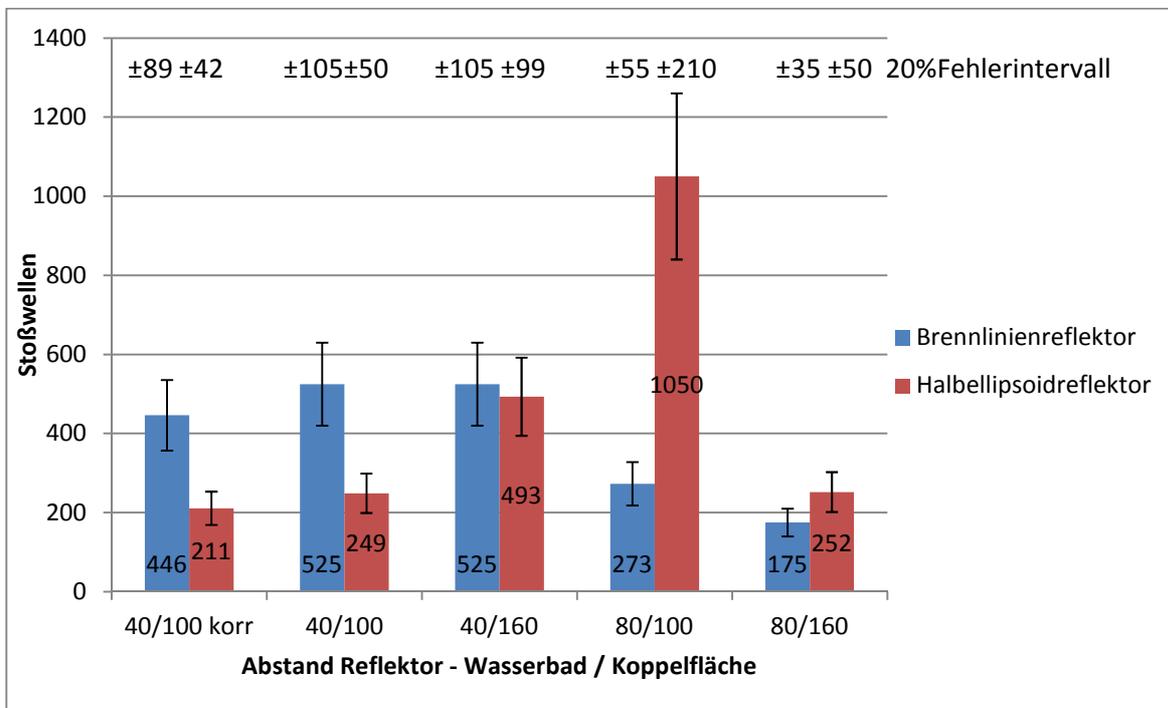


Abbildung 69: Graphik: Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe: 22 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung

Die Maximal- und Minimalwerte der Stoßwellenanzahlen differieren bei dem Brennlinsenreflektor um den Faktor 3, bei dem Halbellipsoidreflektor um den Faktor 4.

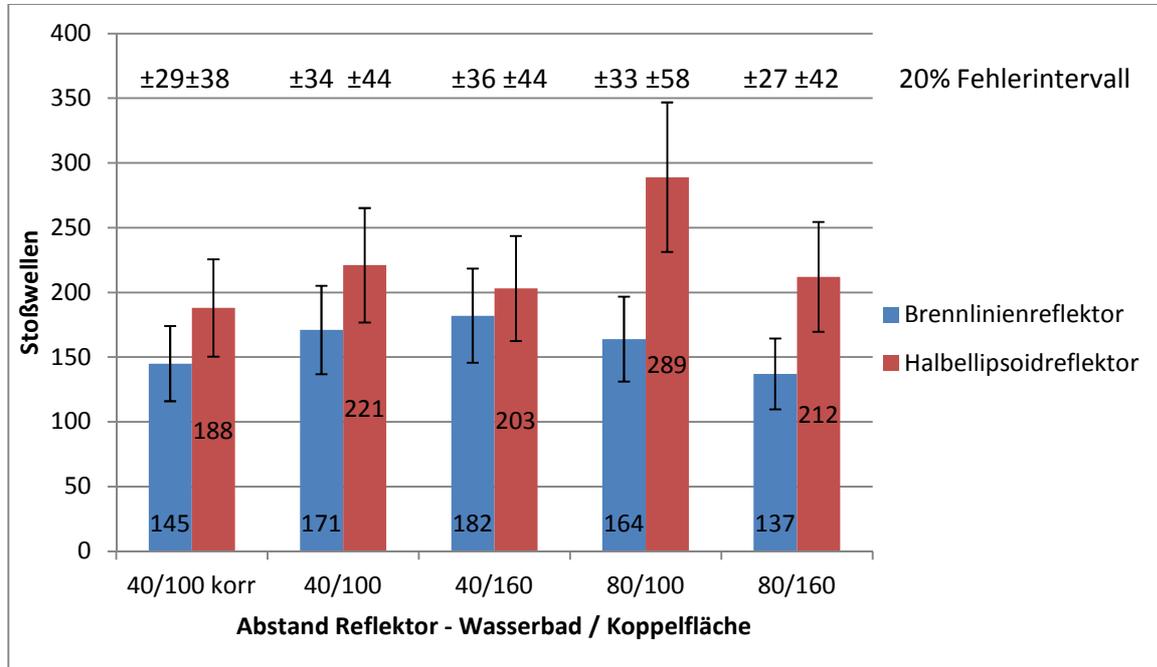


Abbildung 70: Graphik: Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe: 26 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung

Die Maximal- und Minimalwerte der Stoßwellenanzahlen differieren bei dem Brennlinsenreflektor um den Faktor 1,3, bei dem Halbellipsoidreflektor um den Faktor 1,4.

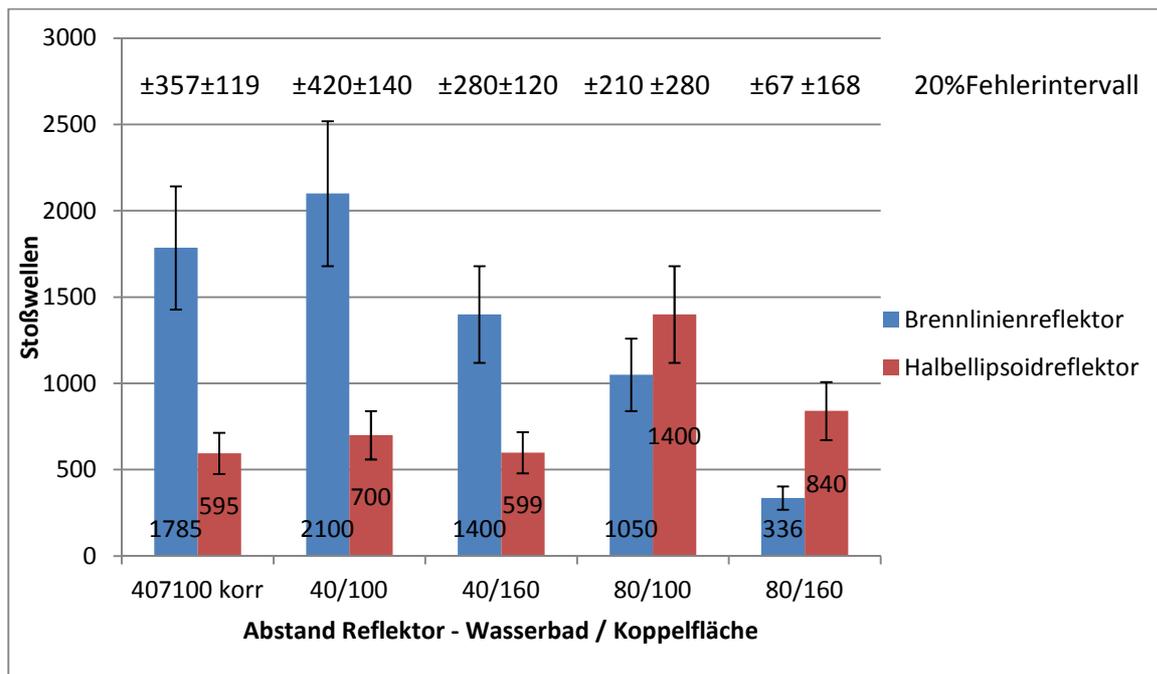


Abbildung 71: Graphik: Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 16 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung

Die Maximal- und Minimalwerte der Stoßwellenanzahlen differieren bei dem Brennlinienreflektor um den Faktor 6, bei dem Halbellipsoidreflektor um den Faktor 2,3.

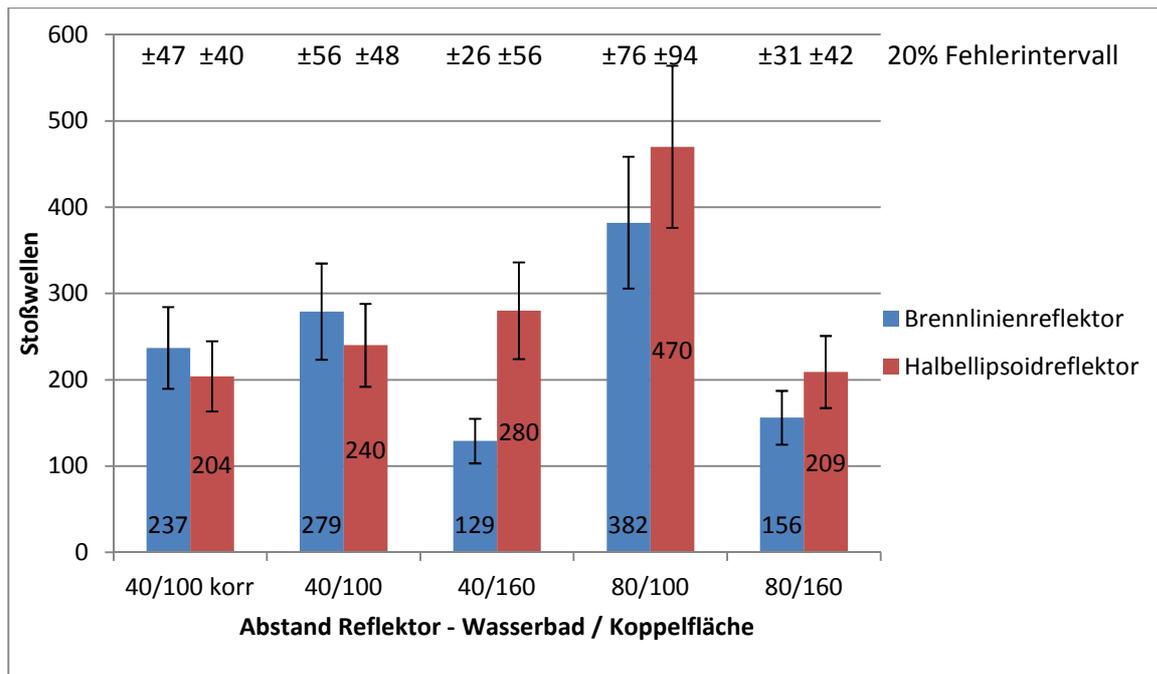


Abbildung 72: Graphik: Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 22 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung

Die Maximal- und Minimalwerte der Stoßwellenanzahlen differieren bei dem Brennlinienreflektor um den Faktor 2,9, bei dem Halbellipsoidreflektor um den Faktor 2, 2.

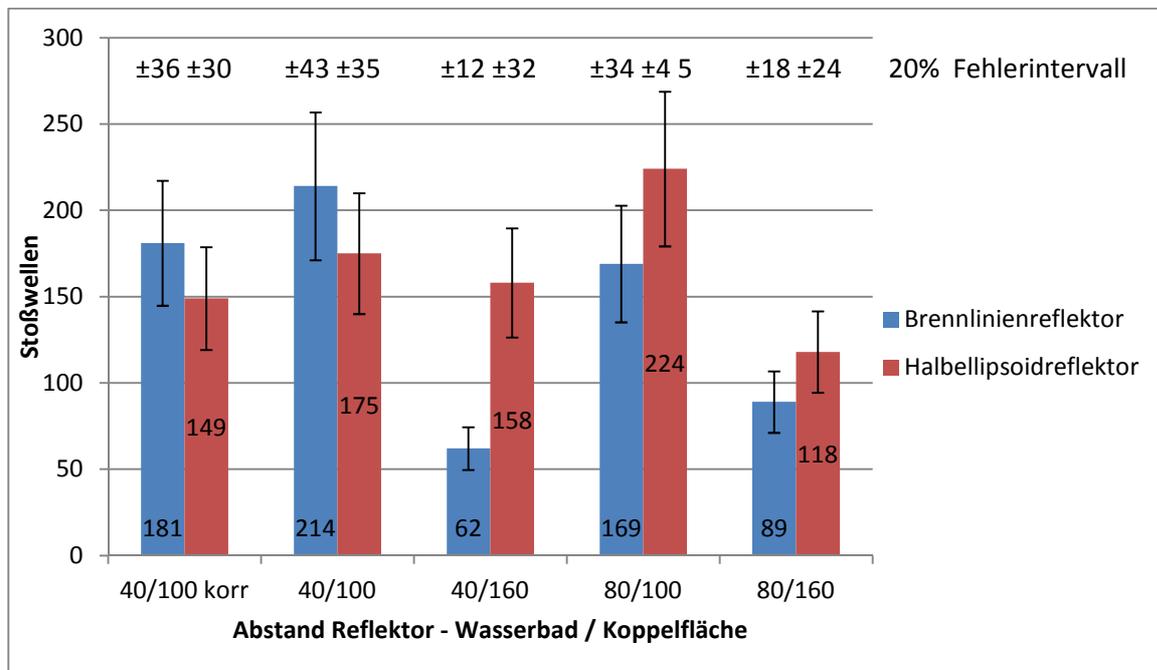


Abbildung 73: Graphik: Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 26 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung

Die Maximal- und Minimalwerte der Stoßwellenanzahlen differieren bei dem Brennlinsenreflektor um den Faktor 3,4, bei dem Halbellipsoidreflektor um den Faktor 1,8.

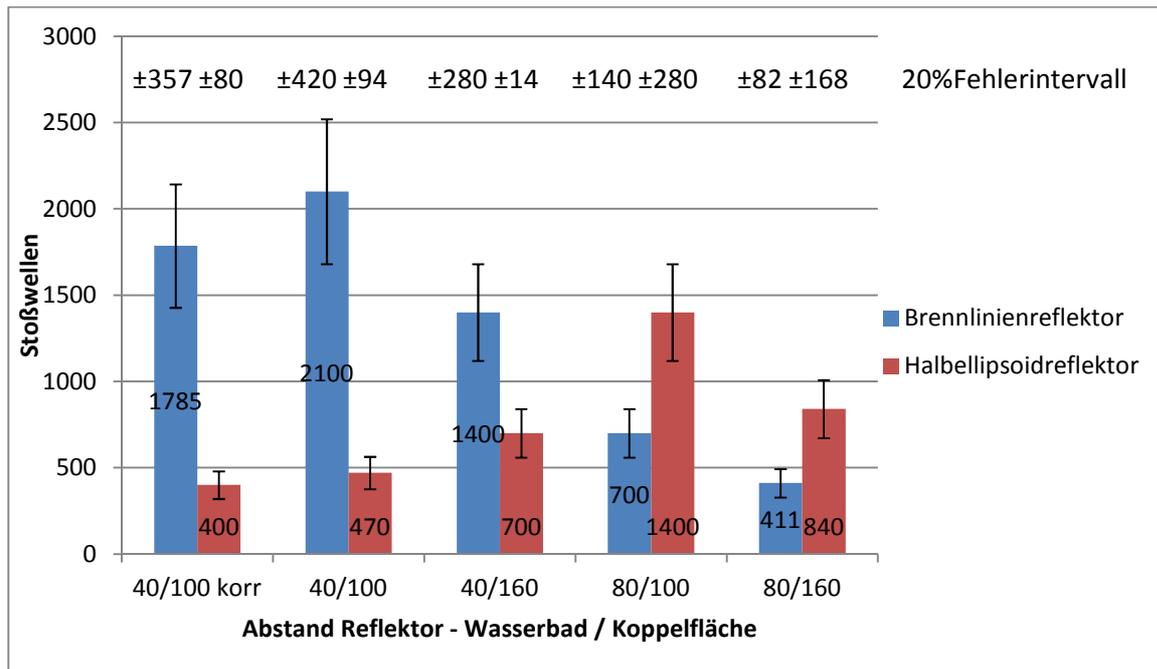


Abbildung 74: Graphik: Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 16 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung

Die Maximal- und Minimalwerte der Stoßwellenanzahlen differieren bei dem Brennlinsenreflektor um den Faktor 5,1, bei dem Halbellipsoidreflektor um den Faktor 2,9.

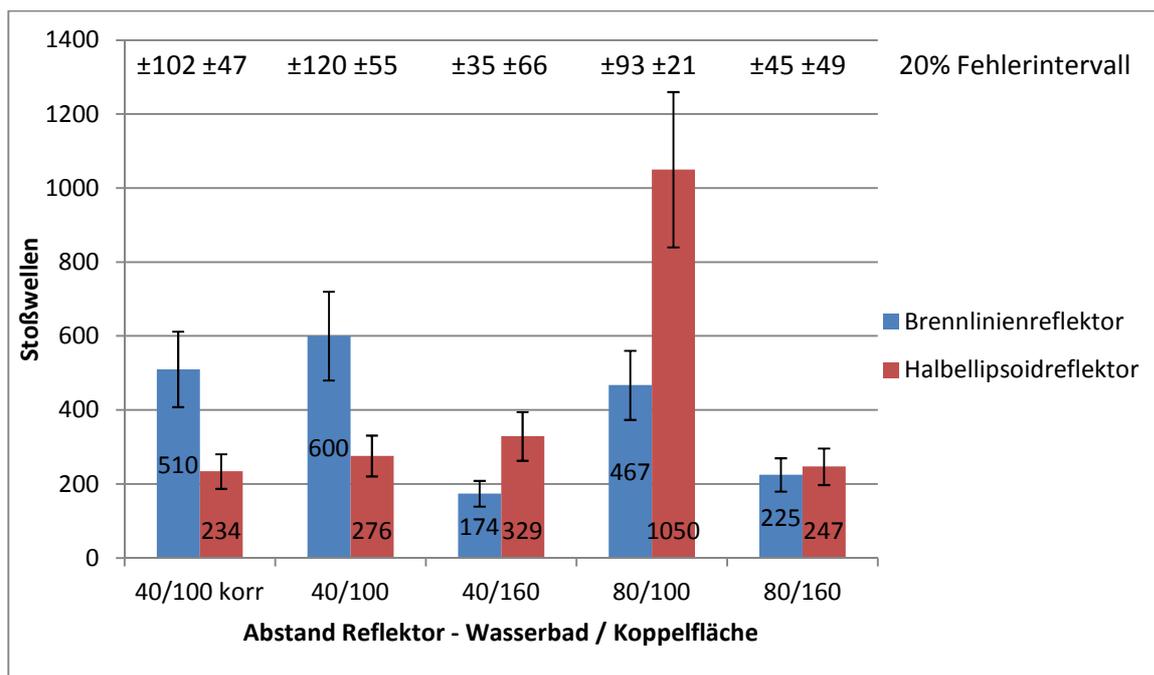


Abbildung 75: Graphik: Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 22 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung

Die Maximal- und Minimalwerte der Stoßwellenanzahlen differieren bei dem Brennlinienreflektor um den Faktor 3,4, bei dem Halbellipsoidreflektor um den Faktor 4,2.

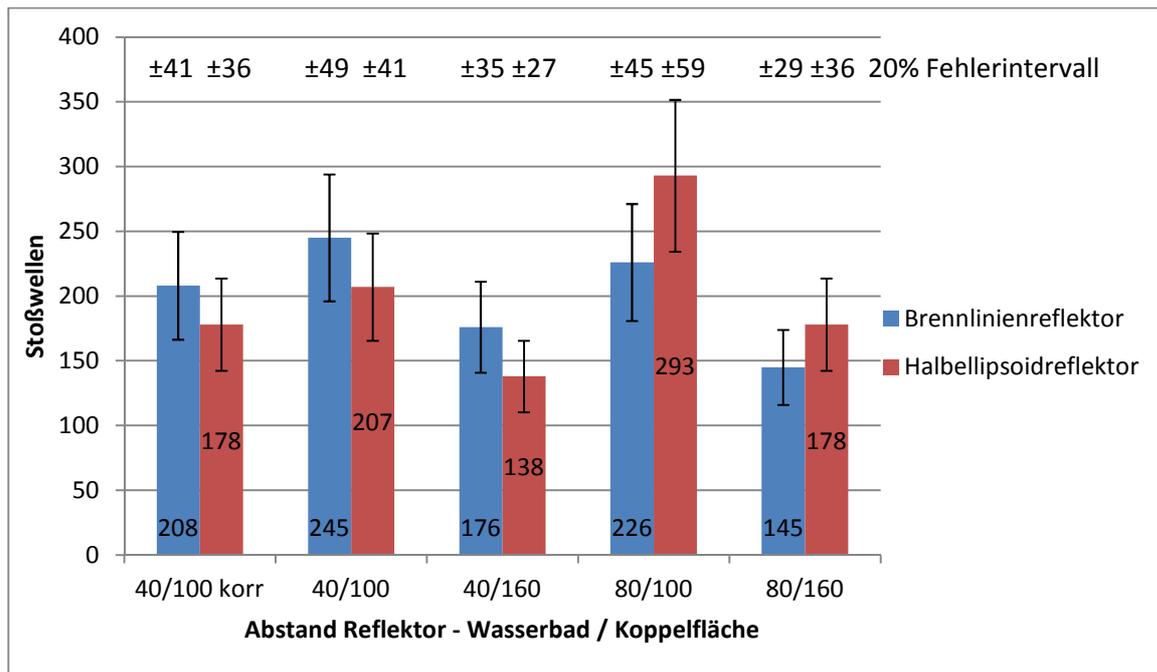


Abbildung 76: Graphik: Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 26 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung

Die Maximal- und Minimalwerte der Stoßwellenzahlen differieren bei dem Brennlinienreflektor um den Faktor 1,7, bei dem Halbellipsoidreflektor um den Faktor 2,1.

4.4. Spezielle Auswertung - Brennlinsenreflektor

4.4.1. Blendeneffekt

Ein Vergleich der vier Blendenstellungen (tief und eng = 40/100; tief und weit = 40/160; hoch und eng = 80/100; und hoch und weit = 80/160) untereinander bei konstanter Energie und effektivem Abstand und bei Berücksichtigung der Fehlergrenzen beim Brennlinsenreflektor zeigt folgendes Bild (Überlappung der Fehlerbereiche = kein sicherer Unterschied = 0, keine Überlappung der Fehlerbereiche = sicherer Unterschied = 1). Die untere und die obere Stoßwellenzahl des entsprechenden Fehlerbereichs sind angegeben.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 1680/2520-1680/2520 0	40/100 – 80/100 1680/2520-840/1260 1	40/100 – 80/160 1680/2520-560/840 1
110	16		40/160 – 80/100 1680/2520-840/1260 1	40/160 – 80/160 1680/2520-560/840 1
				80/100 – 80/160 840/1260-560/840 1

In 5 der möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 420/630-420/630 0	40/100 – 80/100 420/630-218/328 1	40/100 – 80/160 420/630-140/210 1
110	22		40/160 – 80/100 420/630-218/328 1	40/160 – 80/160 420/630-140/210 1
				80/100 – 80/ 160 218/328-140/210 1

In 5 der möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 137/205-146/218 0	40/100 – 80/100 137/205-131/197 0	40/100 – 80/160 137/205-110/164 0
110	26		40/160 – 80/100 146/218-131/197 0	40/160 – 80/160 146/218-110/164 0
				80/100 – 80/ 160 131/197-110/164 0

Bei dieser hohen Energiestufe, überlappen die Fehlergrenzen in allen Kombinationen, der bei den niedrigeren Energiestufen anzunehmende Effekt scheint hier nicht vorhanden, oder in seiner Wirkung zu gering zu sein.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 1680/2520-1120/1680 1	40/100 – 80/100 1680/2520-840/1260 1	40/100 – 80/160 1680/2520-269/403 1
150	16		40/160 – 80/100 1120/1680-840/1260 0	40/160 – 80/160 1120/1680-269/403 1
				80/100 – 80/ 160 840/1260-269/403 1

In 5 der möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 223/335-103/155 1	40/100 – 80/100 223/335-306/458 0	40/100 – 80/160 223/335-125/187 1
150	22		40/160 – 80/100 103/155-306/458 1	40/160 – 80/160 103/155-125/187 0
				80/100 – 80/ 160 306/458-125/187 1

In 4 der möglichen 6 Kombinationen dieser mittleren Energiestufe überlappen die Fehlergrenzen nicht, so muss weiterhin ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 171/257-50/74 1	40/100 – 80/100 171/257-135/209 0	40/100 – 80/160 171/257-71/107 1
150	26		40/160 – 80/100 50/74-135/209 1	40/160 – 80/160 50/74-71/107 0
				80/100 – 80/ 160 135/209-71/107 1

Bei dieser hohen Energiestufe und mittlerem Abstand überlappen die Fehlergrenzen in 4 von 6 möglichen Kombinationen, der bei den niedrigeren Energiestufen anzunehmende Effekt scheint hier mit zunehmendem Abstand stärker zu werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 1680/2520-1120/1680 1	40/100 – 80/100 1680/2520-560/840 1	40/100 – 80/160 1680/2520-329/493 1
180	16		40/160 – 80/100 1120/1680-560/840 1	40/160 – 80/160 1120/1680-329/493 1
				80/100 – 80/ 160 560/840--329/493 1

In allen möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 480/720-139/209 1	40/100 – 80/100 480/720-374/560 0	40/100 – 80/160 480/720-180/270 1
180	22		40/160 – 80/100 139/209-374/560 1	40/160 – 80/160 139/209-180/270 0
				80/100 – 80/ 160 374/560-180/270 1

In 4 der möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 196/294-141/211 0	40/100 – 80/100 196/294-181/271 0	40/100 – 80/160 196/294-116/174 1
180	26		40/160 – 80/100 141/211-181/271 0	40/160 – 80/160 141/211-116/174 0
				80/100 – 80/ 160 181/271--116/174 1

Bei dieser hohen Energiestufe und der hohen Entfernung zum Stein überlappen die Fehlergrenzen in 4 von 6 Kombinationen, in zweien nicht, so dass auch hier der bei den niedrigeren Energiestufen anzunehmende Effekt sich zeigt.

Zusammenfassend überlappen die Fehlerbereiche in 35 von 54 Möglichkeiten nicht (65%),

Wenn die Energiebereiche betrachtet werden, so zeigt sich der Blendeneffekt bei niedriger Energie (16kV) in 16 / 18 Fällen (89%)

bei mittlerer Energie (22kV) in 13 / 18 Fällen (72%)

bei hoher Energie (26kV) in 6 / 18 Fällen (33%)

Der Blendeneffekt ist somit energieabhängig.

Wenn die Stein / Reflektorabstände betrachtet werden, so zeigt sich der Blendeneffekt

bei niedrigem Abstand (110mm) in 10 / 18 Fällen (55%)

bei mittlerem Abstand (150mm) in 13 / 18 Fällen (72%)

bei hohem Abstand (180mm) in 12 / 18 Fällen (66%)

Der Blendeneffekt ist bei allen Abständen nachzuweisen, bei mittlerem Abstand Stein / Reflektor am deutlichsten.

Die Ergebnisse beim Brennlinienreflektor deuten darauf hin, dass eine schallweiche Blende, unabhängig in welchem Abstand sie liegt und welche Apertur sie hat, die Steinfragmentation stört. Mit zunehmender Energie zeigt sich der Effekt immer weniger.

4.1.1.1. Einfluss der Korrektur der geometrischen Abschattung

Wenn die geometrische Abschattung durch Reduktion der Stoßwellenzahl um 15%, korrigiert wird, ändert sich bei dem „Effektiven Abstand 150 mm“ bei 16 und 22 kV und bei dem „Effektiven Abstand 180 mm“ bei 16 und 26 kV die Überlappungen der Fehlergrenzen. Bei dem „Effektiven Abstand 150 mm“ und 16 kV findet sich in der Blendenstellung 40/100 – 40/160 kein Unterschied mehr. Bei 22 kV findet sich in der Blendenstellung 40/100 – 80/160 ein Unterschied.

Bei dem „Effektiven Abstand 180 mm“, 16 kV in der Blendenstellung 40/100 – 40/160 und bei 26 kV in der Blendenstellung 40/100 – 80/160 verschwindet jeweils der Unterschied.

Wenn die Korrektur der geometrischen Abschattung mitberücksichtigt wird, überlappen die Fehlerbereiche in 33 von 54 Möglichkeiten nicht (61%) (ohne Korrektur in 35 (65%)).

Wenn die Energiebereiche betrachtet werden, so zeigt sich der Blendeneffekt bei niedriger Energie (16kV) in 14 / 18 Fällen (77%)

bei mittlerer Energie (22kV) in 14 / 18 Fällen (77%)

bei hoher Energie (26kV) in 5 / 18 Fällen (27%)

Die Abhängigkeit von der Energie zeigt sich weiterhin.

Wenn die Stein / Reflektorabstände betrachtet werden, so zeigt sich der Blendeneffekt

bei niedrigem Abstand (110mm) in 10 / 18 Fällen (55%)

bei mittlerem Abstand (150mm) in 13 / 18 Fällen (72%)

bei hohem Abstand (180mm) in 10 / 18 Fällen (55%)

Der Blendeneffekt ist bei im mittleren Abstand am deutlichsten nachzuweisen.

Die Ergebnisse mit und ohne Korrektur ändern sich nur unwesentlich.

4.4.2. Effekt der Blendenstellung

Zur Klärung der Frage welchen Einfluss die Blendenstellung (tief und eng = 40/100; tief und weit = 40/160; hoch und eng = 80/100; und hoch und weit = 80/160) auf die Fragmentationsleistung ausübt, wird jeder Blendenposition bei konstanter Energie und effektivem Abstand eine Rangsumme zugeordnet. (Fehlerintervall 20%) (Der effektivsten Fragmentation = niedrigsten Stoßwellenzahl die Rangsumme 4, der nächst effektiven die Rangsumme 3,, der uneffektivsten, höchsten Stoßwellenzahl die Rangsumme 1. Bei Überlappung des Fehlerintervalls wird beiden Punkten die gleiche, niedrigere Rangsumme zugewiesen.)

In der folgenden Tabelle (Tab.9) werden die Häufigkeiten der Ränge und die daraus folgende Rangsumme dargestellt.

Effektivität / Blendenstellung	1.Rang	2.Rang	3.Rang	4.Rang	Rangsumme
40/100	4	3	2	1	
40/160	0	0	0	9	9
40/160	0	4	2	3	19
80/100	0	3	1	5	16
80/160	4	4	0	1	29

Tabelle 9: Effektivität / Blendenstellung Brennlinienreflektor (ohne Korrektur geometrische Abschattung)

Bei dem Brennlinienreflektor zeigt sich bei der hohen / weiten Blendenlage (80/160) die höchste Effektivität, gefolgt mit deutlichem Abstand von der tiefen / weiten Lage (40/160), knapp gefolgt von der hohen / engen Blendenlage. Deutlich am uneffektivsten war die tiefe / enge Blendenlage (40/100).

Nach Korrektur der geometrischen Abschattung, durch Reduktion der Stoßwellenzahl um 15%, finden sich folgende Ergebnisse (Tab.10):

Effektivität / Blendenstellung	1.Rang	2.Rang	3.Rang	4.Rang	Rangsumme
	4	3	2	1	
40/100	0	0	1	8	10
40/160	0	3	0	6	15
80/100	0	3	0	6	15
80/160	5	3	0	1	30

Tabelle 10: Effektivität / Blendenstellung Brennlinsenreflektor (nach Korrektur geometrische Abschattung)

Das Ergebnis bezüglich der höchsten / niedrigsten Effektivität ist gleich, lediglich 40/160 und 80/100 trennen sich nicht mehr.

4.4.3. Ergebnisübersicht Brennlinsenreflektor

Da das verwendete Fehlerintervall ($\pm 20\%$) letztlich freigewählt wird, werden zur Absicherung der Ergebnisse die Daten mit zwei weiteren Fehlerintervallen ($\pm 15\%$, $\pm 25\%$) ausgewertet. Zusätzlich wird jeweils noch die geometrische Abschattung korrigiert und die Daten dann mit den Fehlerintervallen ausgewertet. Die folgenden tabellarischen Darstellungen (Tab. 11,12) fassen die Ergebnisse zusammen.

Fehler- intervall	Gesamt N (%)	Energie 16 kV	22 kV	Bereich 26 kV	Stein 110 mm	Reflektor 150mm	Abstand 180mm
15%	38 (70%)	16(89%)	14(78%)	8(44%)	10(56%)	15(83%)	13(72%)
15% korr	35 (65%)	14(78%)	14(78%)	7(39%)	10(56%)	14(78%)	11(61%)
20%	35 (65%)	16(89%)	13(72%)	6(33%)	10(56%)	13(72%)	12(67%)
20% korr	33 (61%)	14(78%)	14(78%)	5(28%)	10(56%)	13(72%)	10(56%)
25%	30 (56%)	13(72%)	12(67%)	5(28%)	8(44%)	12(67%)	10(56%)
25% korr	27 (50%)	13(72%)	10(56%)	4(22%)	7(39%)	11(61%)	9(50%)

Tabelle 11: Gesamtübersicht Blendeneffekt Brennlinsenreflektor

	Blendenstellung			
Fehler- intervall	40/100 Rangsumme	40/160 Rangsumme	80/100 Rangsumme	80/160 Rangsumme
15%	10	17	16	29
15% korr	10	18	15	29
20%	9	19	16	29
20% korr	10	15	15	30
25%	9	17	16	27
25% korr	9	15	15	28

Tabelle 12: Gesamtübersicht Wirksamkeit der Blendenstellung Brennlinienreflektor

4.5. Spezielle Auswertung - Halbellipsoidreflektor

4.5.1. Blendeneffekt

Ein Vergleich der vier Blendenstellungen (tief und eng = 40/100; tief und weit = 40/160; hoch und eng = 80/100; und hoch und weit = 80/160) untereinander bei konstanter Energie und effektivem Abstand und bei Berücksichtigung der Fehlergrenzen beim Halbellipsoidreflektor zeigt folgendes Bild (Überlappung der Fehlerbereiche = kein sicherer Unterschied = 0, keine Überlappung der Fehlerbereiche = sicherer Unterschied = 1). Die untere und die obere Stoßwellenanzahl des entsprechenden Fehlerbereichs sind angegeben.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 840/1260-1120/1680 0	40/100 – 80/100 840/1260-1680/2520 1	40/100 – 80/160 840/1260-840/1260 0
110	16		40/160 – 80/100 1120/1680-1680/2520 1	40/160 – 80/160 1120/1680-840/1260 0
				80/100 – 80/ 160 1680/2520-840/1260 1

In 3 der möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 199/299-394/592 1	40/100 – 80/100 199/299-840/1260 1	40/100 – 80/160 199/299-201/315 0
110	22		40/160 – 80/100 394/592-840/1260 1	40/160 – 80/160 394/592-201/315 1
				80/100 – 80/ 160 840/1260-201/315 1

In 5 der möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 177/265-162/244 0	40/100 – 80/100 177/265-231/347 0	40/100 – 80/160 177/265-170/254 0
110	26		40/160 – 80/100 162/244-231/347 0	40/160 – 80/160 162/244-170/254 0
				80/100 – 80/ 160 231/347-170/254 0

Bei dieser hohen Energiestufe, überlappen die Fehlergrenzen in allen Kombinationen. Der bei den niedrigeren Energiestufen anzunehmende Effekt ist hier nicht nachweisbar.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 560/840-479/719 0	40/100 – 80/100 560/840-1120/1680 1	40/100 – 80/160 560/840-672/1008 0
150	16		40/160 – 80/100 479/719-1120/1680 1	40/160 – 80/160 479/719-672/1008 0
				80/100 – 80/ 160 1120/1680-672/1008 1

In 3 der möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 192/288-224/336 0	40/100 – 80/100 192/288-376/564 1	40/100 – 80/160 192/288-157/251 0
150	22		40/160 – 80/100 224/336-376/564 1	40/160 – 80/160 224/336-157/251 0
				80/100 – 80/ 160 376/564-157/251 1

In 3 der möglichen 6 Kombinationen dieser mittleren Energiestufe überlappen die Fehlergrenzen nicht, so muss weiterhin ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 140/210-126/190 0	40/100 – 80/100 140/210-179/269 0	40/100 – 80/160 140/210-94/142 0
150	26		40/160 – 80/100 126/190-179/269 0	40/160 – 80/160 126/190-94/142 0
				80/100 – 80/ 160 179/269-94/142 1

Bei dieser hohen Energiestufe, aber etwas größerem Abstand überlappen die Fehlergrenzen in 5 von 6 möglichen Kombinationen, der bei den niedrigeren Energiestufen anzunehmende Effekt scheint hier mit zunehmender Energie weniger deutlich zu werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 376/564-560/840 0	40/100 – 80/100 376/564-1120/1680 1	40/100 – 80/160 376/564-672/1008 1
180	16		40/160 – 80/100 560/840-1120/1680 1	40/160 – 80/160 560/840-672/1008 0
				80/100 – 80/ 160 1120/1680-672/1008 1

In 4 der möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 221/331-263/395 0	40/100 – 80/100 221/331-840/1260 1	40/100 – 80/160 221/331-198/296 0
180	22		40/160 – 80/100 263/395-840/1260 1	40/160 – 80/160 263/395-198/296 0
				80/100 – 80/ 160 840/1260-198/296 1

In 3 der möglichen 6 Kombinationen überlappen die Fehlergrenzen nicht, ein bisher nicht erklärter physikalischer Effekt, muss angenommen werden.

Effektiver Abstand	kV	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)	Blendenstellungen STW (\pm)
		40/100 – 40/160 166/248-110/166 1	40/100 – 80/100 166/248-234/352 0	40/100 – 80/160 166/248-142/214 0
180	26		40/160 – 80/100 110/166-234/352 1	40/160 – 80/160 110/166-142/214 0
				80/100 – 80/ 160 234/352-142/214 1

Bei dieser hohen Energiestufe und der hohen Entfernung zum Stein, überlappen die Fehlergrenzen in 3 von 6 Kombinationen, so dass auch hier der bei den niedrigeren Energiestufen anzunehmende Effekt sich zeigt.

Zusammenfassend überlappen die Fehlerbereiche in 25 von 54 Möglichkeiten nicht (46%),

Bei Betrachtung der Energie, zeigt sich der Blendeneffekt

bei niedriger Energie (16kV) in 10 / 18 Fällen (55%)

bei mittlerer Energie (22kV) in 11 / 18 Fällen (61%)

bei hoher Energie (26kV) in 4 / 18 Fällen (22%)

Auch hier ist eine Energieabhängigkeit des Blendeneffekts festzustellen.

Bei Betrachtung des Abstands Stein / Reflektor findet sich der Blendeneffekt

bei niedrigem Abstand (110mm) in 8 / 18 Fällen (44%)

bei mittlerem Abstand (150mm) in 7 / 18 Fällen (39%)

bei hohem Abstand (180mm) in 10 / 18 Fällen (56%)

Der Blendeneffekt tritt vor und hinter dem Fokalfeld / Punkt F_2 des Halbellipsoids (156,6 mm) deutlicher hervor.

Die Ergebnisse beim Halbellipsoidreflektor deuten darauf hin, dass eine schallweiche Blende, gleichgültig in welchem Abstand sie liegt und welche Apertur sie hat, bei geringerer Energie immer stärker die Steinfragmentation stört, das Störpotential scheint hier nicht nur mit der effektiven Entfernung, sondern auch mit dem Abstand vom F_2 verbunden zu sein.

4.5.1.1. Einfluss der Korrektur der geometrischen Abschattung

Wenn die geometrische Abschattung, durch Reduktion der Stoßwellenanzahl um 15%, korrigiert wird, ändert sich bei dem „Effektiven Abstand 180 mm“ bei 16 und 26 kV die Überlappungen der Fehlergrenzen. Bei 16 kV findet sich in der Blendenstellung 40/100 – 40/160 jetzt ein Unterschied. Bei 26 kV findet sich in der Blendenstellung 40/100 – 40/160 kein Unterschied mehr, bei der Blendenstellung 40/100 – 80/100 ein Unterschied.

Wenn die Korrektur der geometrischen Abschattung mitberücksichtigt wird, überlappen die Fehlerbereiche in 26 von 54 Möglichkeiten nicht (48%)(ohne Korrektur in 25 (46%)).

Wenn die Energiebereiche betrachtet werden, so zeigt sich der Blendeneffekt bei niedriger Energie (16kV) in 11 / 18 Fällen (61%)

bei mittlerer Energie (22kV) in 11 / 18 Fällen (61%)

bei hoher Energie (26kV) in 4 / 18 Fällen (22%)

Die Abhängigkeit von der Energie zeigt sich weiterhin.

Wenn die Stein / Reflektorabstände betrachtet werden, so zeigt sich der Blendeneffekt

bei niedrigem Abstand (110mm) in 8 / 18 Fällen (44%)

bei mittlerem Abstand (150mm) in 7 / 18 Fällen (39%)

bei hohem Abstand (180mm) in 11 / 18 Fällen (61%)

Der Blendeneffekt tritt vor und hinter dem Fokalfeld / Punkt F_2 des Halbellipsoids (156,6 mm) deutlicher hervor.

Die Ergebnisse beim Halbellipsoidreflektor deuten darauf hin, dass eine schallweiche Blende, unabhängig in welchem Abstand sie liegt und welche Apertur sie hat, bei geringerer Energie immer stärker die Steinfragmentation stört, das Störpotential scheint hier nicht mit der effektiven Entfernung, sondern mit dem Abstand vom F_2 verbunden zu sein.

4.5.2. Effekt der Blendenstellung

Zur Klärung der Frage, welchen Einfluss die Blendenstellung (tief und eng = 40/100; tief und weit = 40/160; hoch und eng = 80/100; und hoch und weit = 80/160) auf die Fragmentationsleistung ausübt, wird jeder Blendenposition bei konstanter Energie und effektivem Abstand eine Rangsumme zugeordnet. (Fehlerintervall 20%) (Der effektivsten Fragmentation = niedrigsten Stoßwellenzahl die Rangsumme 4, der nächst effektiven die Rangsumme 3, ..., der uneffektivsten, höchsten Stoßwellenzahl die Rangsumme 1. Bei Überlappung des Fehlerintervalls wird beiden Punkten die gleiche, niedrigere Rangsumme zugewiesen.)

In der folgenden Tabelle (Tab. 13) werden die Häufigkeiten der Ränge und die daraus folgende Rangsumme dargestellt.

Effektivität / Blendenstellung	1.Rang	2.Rang	3.Rang	4.Rang	Rangsumme
40/100	4	3	2	1	
40/160	1	2	4	2	20
40/160	0	2	5	2	18
80/100	0	0	0	9	9
80/160	0	2	5	2	18

Tabelle 13: Effektivität / Blendenstellung Halbellipsoidreflektor (ohne Korrektur geometrische Abschattung)

Bei dem Halbellipsoidreflektor liegen die drei Blendenstellungen (tiefe / enge Blendenlage (40/100); weite / hohe Blendenlage (80/160) und die tiefe / weite Lage (40/160)) eng beieinander (Rangsummen 20,18,18). Die hohe / enge Blendenlage ist deutlich am uneffektivsten (Rangsumme 9).

Bei Berücksichtigung der geometrischen Abschattung und entsprechender Korrektur der Werte, ergibt sich folgende Tabelle (Tab. 14):

Effektivität / Blendenstellung	1.Rang	2.Rang	3.Rang	4.Rang	Rangsumme
	4	3	2	1	
40/100	1	2	4	2	20
40/160	0	1	6	2	17
80/100	0	0	0	9	9
80/160	0	2	6	1	19

Tabelle 14: Effektivität / Blendenstellung Halbellipsoidreflektor (nach Korrektur geometrische Abschattung)

Auch hier liegen die drei Blendenstellungen (tiefe / enge Blendenlage (40/100); weite / hohe Blendenlage (80/160) und die tiefe / weite Lage (40/160)) eng beieinander (Rangsummen 20,19,17). Die hohe / enge Blendenlage ist deutlich am uneffektivsten (Rangsumme 10).

4.5.3. Ergebnissübersicht Halbellipsoidreflektor

Da das verwendete Fehlerintervall ($\pm 20\%$) letztlich freigewählt wird, werden zur Absicherung der Ergebnisse die Daten mit zwei weiteren Fehlerintervallen ($\pm 15\%$, $\pm 25\%$) ausgewertet.

Zusätzlich wird jeweils noch die geometrische Abschattung korrigiert und die Daten dann mit den Fehlerintervallen ausgewertet. Die folgenden tabellarischen Darstellungen (Tab.15, 16) fassen die Ergebnisse zusammen.

Fehlerintervall	Gesamt N (%)	Energie		Bereich 26 kV	Stein 110 mm	Reflektor 150mm	Abstand 180mm
		16 kV	22 kV				
15%	34 (63%)	13(72%)	12(67%)	9(50%)	11(61%)	11(61%)	12(67%)
15% korr	34 (63%)	13(72%)	13(73%)	8(44%)	11(61%)	11(61%)	12(67%)
20%	25 (46%)	10(55%)	11(61%)	4(22%)	8(44%)	7(39%)	10(56%)
20% korr	26 (48%)	11(61%)	11(61%)	4(22%)	8(44%)	7(39%)	11(61%)
25%	23 (43%)	10(56%)	11(61%)	2(11%)	7(39%)	8(44%)	8(44%)
25% korr	26 (48%)	11(61%)	11(61%)	4(22%)	7(39%)	8(44%)	11(61%)

Tabelle 15: Gesamtübersicht Blendeneffekt Halbellipsoidreflektor

Fehlerintervall	Blendenstellung			
	40/100 Rangsumme	40/160 Rangsumme	80/100 Rangsumme	80/160 Rangsumme
15%	20	18	9	18
15% korr	20	18	9	18
20%	20	19	9	17
20% korr	20	16	9	20
25%	19	17	9	19
25% korr	20	18	9	20

Tabelle 16: Gesamtübersicht Wirksamkeit der Blendenstellung Halbellipsoidreflektor

4.6. Zusammenfassung der Ergebnisse:

Bei den Versuchen findet sich der überraschender Effekt, dass eine schallweiche Blende außerhalb oder knapp innerhalb des Strahlengangs, bei sonst gleichen Versuchsbedingungen, zu stark differierenden Zertrümmerungsleistungen führt.

4.6.1. Zusammenhang mit Stoßwellenenergie:

Der Effekt ist bei dem Halbellipsoidreflektor, wie bei dem Brennlinsenreflektor, bei geringer Stoßwellenenergie deutlicher, bei höherer Energie weniger ausgeprägt.

4.6.2. Zusammenhang mit der Entfernung Stoßwellenkopf / Stein:

Hier sind Unterschiede zwischen den Reflektortypen festzustellen.

Beim Brennlinsenreflektor ist keine sichere Abhängigkeit von der Entfernung Stoßwellenkopf / Stein zu erkennen.

Beim Halbellipsoidreflektor ist der Effekt um den Punkt F_2 am geringsten.

4.6.3. Effektivität der Blendenstellung

Hier sind Unterschiede zwischen den Reflektortypen festzustellen.

Beim Brennlinsenreflektor ist die Blendenstellung weit / hoch [80/160] am effektivsten, die Blendenstellung eng / tief [40/100] am uneffektivsten. Dies findet sich in allen Auswertungen, mit und ohne geometrische Korrektur, egal welche Fehlerintervalle verwendet werden. Die Blendenstellung tief / weit [40/160] ist etwas effektiver als die Blendenstellung hoch / eng [80/100], die Unterschiede sind über die verschiedenen Auswertungen jedoch nicht so ausgeprägt.

Beim Halbellipsoidreflektor sind die Unterschiede weniger stark ausgeprägt, die Blendenstellung tief / eng [40/100] ist am effektivsten, die Blendenstellung hoch / eng [80/100] am uneffektivsten. Dies findet sich in allen Auswertungen, mit und ohne geometrische Korrektur, unabhängig welche Fehlerintervalle verwendet werden. Die Blendenstellungen hoch / weit [80/160] und tief / weit [40/160] sind nur gering uneffektiver als die effektivste Blendenstellung tief / eng [40/100].

5. Diskussion

Folgende Hauptfragestellungen sollen im Rahmen der vorliegenden experimentellen in vitro Studie beantwortet werden.

1. Kann eine ringförmige schallweiche Blende (Luft), wie sie durch Ankopplung des Behandlungskopfes eines Lithotriptors entsteht, auch wenn sie außerhalb / knapp innerhalb des geometrischen Schallgangs liegt, einen deutlichen Einfluss auf die Zertrümmerungsleistung haben?

Wenn sich ein Blendeneffekt nachweisen lässt, folgen hieraus die folgenden Fragen:

2. Lässt sich dieser Effekt sowohl bei Fokussierung der Stoßwellenenergie auf einer Brennlinie (Brennlinienreflektor, Lithospace[®] – Lithotriptor) als auch bei Fokussierung der Stoßwellen auf ein punktförmiges Fokalareal (Halbellipsoid Reflektor, HM₃ - Typ) nachweisen?
3. Können aus den Ergebnissen Hinweise für die klinische Anwendung der Stoßwellenlithotripsie gewonnen werden?

5.1. Datenbewertung

Bevor die Ergebnisse bewertet und gedeutet, diskutiert werden können, muss zuerst die Validität der Daten beleuchtet werden. Die Daten müssen zum einen in Ihrer Gesamtheit (Gesamtplausibilität), aber auch als Einzelwert auf systematische / zufällige Fehler (Fehlerdiskussion) betrachtet werden.

5.1.1. Betrachtung des Datenkollektivs

Bei den vorliegenden Stichproben wird jeder definierte Punkt nur einmal gemessen. Dies ist der Grund, warum auf eine weitergehende statistische Bearbeitung verzichtet werden muss. Eine Prüfung der Frage, ob die erhobenen Werte in sich stimmig sind, ob Ausreißer – Werte vorliegen, kann daher nicht wie sonst mit statistischen Methoden erfolgen (Mittelwert, Standardabweichung, etc.). Hier müssen andere Maßstäbe herangezogen werden. Zum einen kommt der Vergleich mit standardisierten Meßwerten, bei denen def. Fehlerbereiche bekannt sind, in Frage. Zu nennen wäre hier z.B. die Prüfvorschrift des Herstellers der Stoßwellenquellen. Es liegt eine Prüfvorschrift für den Brennlinsenreflektor vor. Eine andere Prüfmöglichkeit der Abschätzung der Plausibilität der Messwerte liegt in der Kontrolle des Kohortenverhaltens der Messwerte bei einem klinisch allgemein bekannten Phänomen. Hier bietet sich an zu prüfen, ob die Anzahl der notwendigen Stoßwellen bei Steigerung der kV – Werte und sonst konstanten Bedingungen in allen Fällen sinkt. Da die Hauptfrage des experimentellen Ansatzes der Einfluss einer schallweichen Blende ist (definiert durch Durchmesser der Ankopplfläche und Koppelabstand) können diese Variablen (Ankopplfläche, Koppelabstand) nicht zur Plausibilitätsabschätzung herangezogen werden.

5.1.1.1. Prüfvorschrift des Herstellers

Für den Brennlinsenreflektor liegt eine Systemprüfvorschrift des Herstellers AST vor.

Der Performancetest des Lithospace© Systems wird wie folgt durchgeführt:

Der Performancetopf mit einem Durchmesser von 140 mm wird mit einem Abstand von 40 mm über dem Oberrand des Reflektors fixiert. Die Ankoppelung erfolgt mit handelsüblichem Ultraschallgel ohne Luftblasen, optische Kontrolle nach Ankoppelung. Ein 15 min gewässerter Kunststein AST 0118 wird in 160 mm Abstand zur Reflektoroberkante in einem Steinnetz fixiert. Es werden Stoßwellen mit 22 kV und 1 Hz Repetitionsfrequenz abgegeben.

Die verwendete Elektrode wird mit 600 STW eingeschossen, um einen Elektrodendrift zu vermindern. Es werden drei Steine fragmentiert, die Ergebnisse gemittelt. Bei einer Stoßwellenanzahl von > 300 STW / Stein wird das System als intakt bewertet. Es werden 230 STW \pm 20 STW als Ergebnis erwartet.

Die hier erhobenen Messwerte werden zum Teil mit Parametern erhoben, die nicht den Parametern des Performancetests entsprechen. Die kV Anzahl, Stoßwellenrepetitionsfrequenz, der verwendete Stein und die Steinvorbereitung sowie ein Koppelabstand entsprechen dem Performancetest.

Abweichend hiervon werden Koppelflächendurchmesser von 100 mm und 180 mm verwendet, die Steine sind 150 mm und 180 mm von der Reflektoroberkante entfernt. Die Ankoppelsituation mit einer Metallkante am Unterrand des Performancetopfs entspricht einer schallharten und nicht einer schallweichen Situation.

Die am nächsten liegenden erhobenen Messwerte:

Koppelfläche: 100 mm Ø	100 mm Ø	160 mmØ	160 mmØ	Performancetest
Eff. Abstand: 150 mm	180 mm	150 mm	180 mm	
	279 STW	600 STW	129 STW	176 STW
				230 \pm 20 STW

Die erhobenen Messwerte liegen bei 100 mm Ø Koppelfläche über, bei 160 mm Ø Koppelfläche unter dem Wert des Performancetests. In Hinblick auf die systematischen Unterschiede der Messungen Performancetest / Experimentelle Situation sind die erhobenen Messwerte als valide anzusehen.

5.1.1.2. Meßwertverhalten „kV Erhöhung“

Für einen internen Vergleich der Messwerte bietet sich der Parameter: „Stoßwellenanzahl bei Erhöhung der kV“ an. Sinkt die Anzahl der notwendigen Stoßwellen bei Steigerung der kV – Werte und sonst konstanten Bedingungen in allen Fällen oder nicht? Dies ist der allgemeinen klinischen Erfahrung nach zu erwarten.

Die graphische Auswertung Stoßwellenanzahl vs. Erhöhung kV liegt unter 4.3.4.1 - 12 vor, in jedem Fall sinkt die benötigte STW – Anzahl bei steigendem KV - Wert.

Somit entspricht das Verhalten aller Messwerte der allgemeinen klinischen Erfahrung und man kann sie als valide ansehen.

Da die Hauptfrage des experimentellen Ansatzes der Einfluss einer schallweichen Blende ist (definiert durch Durchmesser der Ankoppelfläche und Koppelabstand), können die Variablen Ankoppelfläche und Koppelabstand prinzipiell nicht zu Plausibilitätsabschätzungen herangezogen werden. Außerdem liegen genau für diese Fragestellung keine klinisch fundierten Erfahrungswerte vor. Somit können keine weiteren internen Plausibilitätsprüfungen vorgenommen werden.

5.1.2. Fehlerdiskussion

In der Fehlerdiskussion soll versucht werden, die systematischen Fehlermöglichkeiten zu identifizieren und in ihrer Auswirkung auf die Messwerte abzuschätzen.

Die Prüfvorschrift für den Brennlinsenreflektor ist bekannt und die entsprechenden Meßergebnisse liegen schon vor der Durchführung dieser Messungen vor. In der Prüfvorschrift wird mit einer Abweichung von ± 20 STW bei einem erwarteten Wert von 230 STW gerechnet, also ca. 9%.

Bei elektrohydraulischer Stoßwellenerzeugung kommt es zu Druckschwankungen der Stoßwelle durch nicht im Fokus der Elektrode entstehende Funkenentladungen. Müller gibt für die Halbellipsoidgeneratoren von Dornier eine Standardabweichung von ca. 11% an (46). Diese kann für den verwendeten Halbellipsoidgenerator, bei der grundsätzlichen Ähnlichkeit mit den dort gemessenen Halbellipsoidgeneratoren, übernommen werden. Liebler gibt in seinem Report über die Druckfeldmessungen die dem verwendeten Brennlinsenreflektor eine Abweichung zwischen 4% und 19%, also gemittelt ca. 11- 12% an (40). Dies entspricht dem Wert von Müller und zeigt so, dass dieser Effekt bei beiden elektrohydraulischen Stoßwellengeneratoren gleichartig auftritt.

In der Müller'schen Arbeit sind die Stoßwellengeneratoren HM₃, HM_{3mod}, HM₄ und XL₁ in einen offenen Wasserbad, bei dem MPL 9000 und den MFI 5000 in einem geschlossenen Wasserbad. Die Messungen von Liebler finden ebenfalls in einem offenen Wasserbad statt. Der Unterschied offenes / geschlossenes Wasserbad hat offensichtlich keinen Einfluss.

Ein weiterer Elektrodeneffekt, der Abbrand, hat zwar zur Folge, dass bei zunehmendem Abbrand die Elektrodenspannung gesteigert werden muss, führt aber nur zu einer geringen

Drucksteigerung im Fokus, das Fokalfeld wird dadurch aber breiter, ein Nebeneffekt: die Zertrümmerung wird dadurch gegen Positionierungsfehler unempfindlicher (46).

Eine nicht unerhebliche Einflußquelle ist das Koppelmedium zwischen dem Koppelbalg des Lithotriptors und dem Performancetopf. Pishhalnikov, Jain und Bergsdorf können sowohl den Einfluss des Koppelmediums (Silikon Öl, Ultraschall- Gel (mit + ohne Luftblasen), EMLA[®] – Creme, etc.) als auch den extremen Einfluss von Luftblasen im Koppelmedium nachweisen(4, 28, 52). Bei Bergsdorf zum Beispiel führt eine Luftblase von 2%, entsprechend einem Durchmesser von 2,1 cm / 3,46 cm² Fläche, zu einer Erhöhung der zur Fragmentation notwendigen Stoßwellenanzahl um über 50%.

In der Prüfvorschrift werden drei Steine in einem Wasseransatz zertrümmert, es kommt zu einer zunehmenden Trübung des Mediums, es darf angenommen werden, dass mit zunehmender Trübung des Mediums durch schwebende Gipspartikel die Stoßwellen zunehmend gestreut werden.

Die geometrisch sichere Platzierung des Kunststeins im Fokalbereich ist bei dem original Performancetopf durch eine Metallsteinhalter / Netz Kombination gesichert.

Im Performancetest Modell relativieren sich die beschriebenen Fehler gegenseitig:

- 1.) Druckschwankungen durch geometrische Streuung des Entstehungsfokus F1
- 2.) Druckschwankung durch Erhöhung der kV Anzahl bei Elektrodendrift / Abbrand
- 3.) Das Koppelmedium und sein Luftblasengehalt
- 4.) Die Energiedispersion durch Steintrümmer in der Flüssigkeit des Performancetopfs.
- 5.) Axiale Dislokation des Teststeins

Dies führt zur einem Gesamtfehler von ca. 9%.

In der Experimentalsituation ändern sich einige der oben genannten Parameter und neue kommen hinzu:

- 1.) Die Druckschwankungen durch geometrische Streuung des Entstehungsfokus F1, ändern sich nicht.
- 2.) Die Druckschwankung durch Erhöhung der kV Anzahl bei Elektrodendrift / Abbrand bleibt ebenfalls im vorgegeben Rahmen.
- 3.) Das Koppelmedium und sein Luftblasengehalt bleiben ebenfalls vergleichbar.
- 4.) Die Energiedispersion durch Steintrümmer in der Flüssigkeit des Performancetopfs ist sicherlich höher, da bis zu 5 Steinen einem Wasseransatz fragmentiert wurden.
- 5.) Die axiale Dislokation des Teststeins ist hier in der Experimentalsituation sicherlich höher anzusetzen der geringeren mechanischen Stabilität von Steinhalter / Netz geschuldet. Im originalen Performancetopf ist die Position des Steinhalters konstruktiv vorgegeben. Die Position des Steins im Versuchsaufbau wurde optisch kontrolliert und ist damit ungenauer. Die Versuche mit 16 kV Generatorspannung sind hier besonders empfindlich, da das Fokalfeld bei 16 kV am schmalsten ist und bei höheren Generatorspannungen breiter wird (40, 46).
- 6.) Ein weiterer Faktor rührt aus der Fragestellung her. Im Performancemodell wird mit einem fixen Koppelabstand 40 mm und dem Gesamtabstand von 160 mm zum Reflektorberrand gearbeitet. Das bedeutet, dass im Verlauf von drei Steinertrümmerungen die Stoßwellen 120 mm zunehmend getrübt Wasser, d.h. Energie dispergierendes Wasser durchlaufen. In der Experimentalsituation wird auch mit einem Koppelabstand von 80 mm gearbeitet, was bedeutet dass 50% der Meßpunkte eine deutlich längere Verlaufsstrecke (40mm) im entgasten, optimal leitenden Wasser des Koppelbalgs haben (Abb. 77).

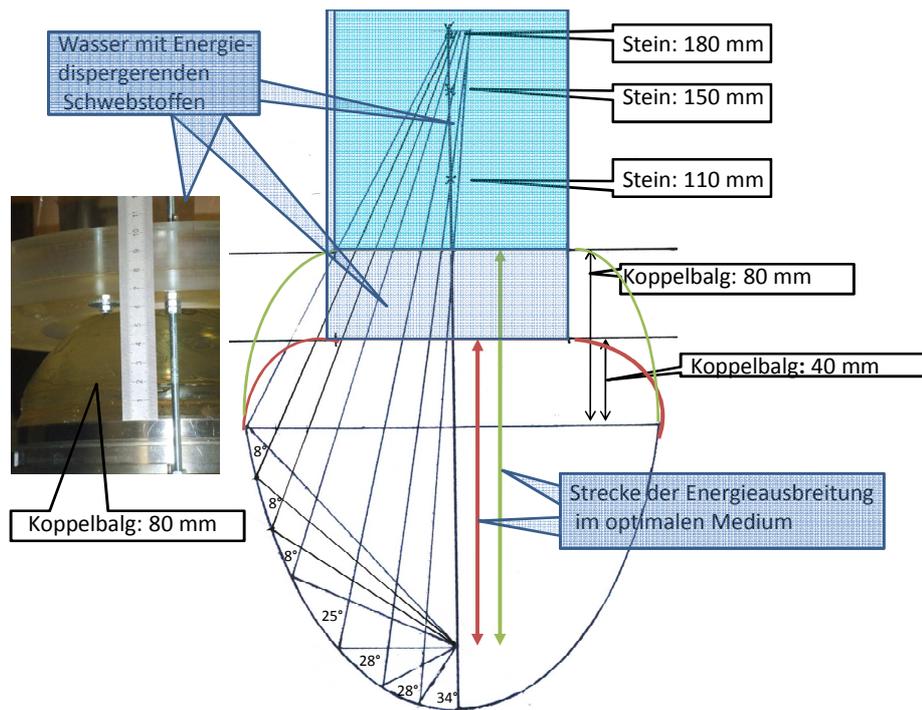


Abbildung 77: Darstellung des Unterschieds der Laufstrecke der Stoßwelle in optimalem Ausbreitungsmedium je nach Koppelabstand, hier am Brennlinsenreflektor

- 7.) Eine zusätzliche Fehlerquelle liegt sicherlich bei den Steinen vor, die nicht komplett fragmentiert wurden. Die Stoßwellenanzahl wurde durch Extrapolation des Abtrags ermittelt. Nach Abbruch der Fragmentation wurden die Steinfragmente aus dem Steinnetz auf Löschpapier ausgeklopft, in eine Petrischale verbracht und anschließend 24 h bei Raumtemperatur (22° C) getrocknet. Die Fragmente wurden mit einer „digital pocket scale ES Serie“ mit 0,05gr Meßgenauigkeit gewogen. Bei einem Steingewicht von 0,7 g macht dies einen Fehler von ca. 7% aus.
- 8.) Eine weitere Fehlerquelle ist die mögliche Ungenauigkeit bei der Einstellung der Koppelfläche (100 mm und 160 mm Ø) mit der schallweichen Blende zu sehen. Bei der Blendensituation 100 mm Ø wird eine Luftpolsterfolie auf den Koppelbalg aufgelegt dann provisorisch angekoppelt und der Testzylinder mit Wasser gefüllt. Dadurch wird Druck auf die Membran des Testzylinders und den Koppelbalg ausgeübt. Dadurch verbreitert sich die Koppelzone. Durch Erhöhen des Volumens im Koppelbalg wird die Kontaktzone soweit verbreitert, dass die Markierungen erreicht werden (Abb. 36, 37), das Koppelergebnis wird optisch kontrolliert.

Wenn man eine Abweichung von ± 1 mm annimmt, so kann die Fläche als Kreisring gemäß der folgenden Formel berechnet werden:

$$A = \frac{\pi}{4} (d_2 + d_1)(d_2 - d_1)$$

wobei $d_2 = 101$ mm, $d_1 = 99$ mm entspricht.

$$A = \frac{3,14159}{4} (101 + 99)(101 - 99)$$

$$A = 314,15 \text{ mm}^2$$

Bei Anwendung auf den Koppeldurchmesser 160 mm folgt, dass $d_2 = 161$ mm, $d_1 = 159$ mm entspricht; daraus folgt:

$$A = \frac{3,14159}{4} (161 + 159)(161 - 159)$$

$$A = 502,65 \text{ mm}^2$$

Zur Bestimmung der Größe des Fehlers ist die Kenntnis der Größe der Koppelfläche notwendig.

Bei einem Koppeldurchmesser von 100mm entsteht eine Fläche nach der Formel:

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi}{4} d^2$$

Bei $d = 100$ ergibt dies

$$A = \frac{3,14159}{4} 100^2$$

$$A = 7853,97 \text{ mm}^2$$

Bei $d = 160$ ergibt dies

$$A = \frac{3,14159}{4} 160^2$$

$$A = 20106,17 \text{ mm}^2$$

Daraus folgt, dass bei dem Koppeldurchmesser 100 mm / Koppelfläche $7853,97 \text{ mm}^2$ die Fläche des Fehlerrings $314,15 \text{ mm}^2$ entsprechend 4 % beträgt. Bei dem Koppeldurchmesser 160 mm / Koppelfläche $20106,17 \text{ mm}^2$ beträgt die Fläche des Fehlerrings $502,65 \text{ mm}^2$ entsprechend 2,5 %.

Die Arbeiten von Pishhalnikov, Jain und Bergsdorf zeigen einen hohen Einfluss von Luftblasen in der Koppelfläche auf die Zertrümmerungsleistung(4, 28, 52). Bergsdorf zeigte, dass ein Luftblasenareal mit einem Gesamtdurchmesser von 2,1 cm, entsprechend $3,46 \text{ cm}^2$ Fläche, zu einer Erhöhung der zur Fragmentation notwendigen Stoßwellenanzahl um über 50% führt. Die Fehlerkreisringe, besonders der bei Koppeldurchmesser 100mm, könnten als Luftblasenareal angesehen werden. Dies würde zu einem Gesamtfehler von mindestens 50% führen. In den Arbeiten von Pishhalnikov und Jain waren die Luftblasen über das gesamte Koppelfeld verteilt, Bergsdorf macht über die Lokalisation keine Aussage(4, 28, 52). Aufgrund der Energieverteilung der Stoßwelle (Abb.16), die im wesentlichen einer Gaußschen Verteilung entspricht, ist die Störwirkung von Luftblasen die über die gesamte Koppelfläche verteilt sind viel höher anzusehen, als in einem „Luftblasenring“ am Rand der Koppelfläche. Deshalb ist der „Luftblasenring“ als stärkere Fehlerquelle verworfen worden.

- 9.) Die geometrische Abschattung, die bei beiden Reflektoren auftritt, betrifft insgesamt 18 Messungen (40 mm Koppelabstand, Koppeldurchmesser 100 mm, 110, 150 und 180 mm Abstand Stein Reflektor bei 16, 22 und 26 kV). Nach Rekonstruktion (siehe Abschnitt 3.5.) beträgt sie jeweils 15%. Da insgesamt 25% der Messungen betroffen sind, wurden die Werte korrigiert und die korrigierten Werte sowie die Rohwerte in die Auswertungen einbezogen. Deshalb sollte dieser Effekt nicht in den allgemeinen Fehler eingerechnet werden, sondern gesondert bewertet werden.

Zusammenfassend ist hier, der Experimentalsituation geschuldet, mit einem Gesamtfehler von ca. 20% zu rechnen. Die Ergebnisse werden mit den oberen und unteren Fehlergrenzen in den Ergebnistabellen (Tab.5,6,7,8) dargestellt.

Da die Faktoren, die zu der Größenabschätzung des Gesamtfehlers geführt haben, sicherlich auch größer oder kleiner angesetzt werden können, wurden die Rohdaten (auch nach Korrektur der geometrischen Abschwächung) zusätzlich mit einem Gesamtfehler von 15% und 25% bearbeitet. Die Ergebnisse sind tabellarisch in den Abschnitten 4.4.3 (Tab.11, 12) und 4.5.3 (Tab.15, 16) dargestellt.

5.2. Blendeneffekt

Die Ergebnisse, insbesondere in den graphischen Darstellungen im Abschnitt 4.3.5 (Abb.68-76) zeigen ein überraschend deutliches Ergebnis. Die Zertrümmerungsleistung ist in nahezu allen Energiestufen, allen effektiven Abständen und bei allen Blendenstellungen (40 / 100, 40 / 160, 80 / 100, 80 / 160) unterschiedlich. Dies gilt für beide Reflektortypen.

Der Blendeneffekt kann in den Auswertungen sowohl für den Brennlinsenreflektor als auch für den Halbellipsoidreflektor nachgewiesen werden.

Es stellt sich die Frage nach dem Einfluss der geometrischen Abschattung.

Nach der geometrischen Rekonstruktion tritt eine Energieabschwächung von 15% bei dem effektiven Steinabstand 180 mm, Blendehöhe 40 mm und Blendendurchmesser 100 mm auf. Dadurch sind 15% größere Stoßwellenzahlen zu erwarten. Es sind 6 Meßpunkte betroffen, es wurden um 15% kleinere Werte errechnet (Tab. 17):

kV	Brennlinsenreflektor	Brennlinsenreflektor	Halbellipsoidreflektor	Halbellipsoidreflektor
	Roh wert	Mit Korrekturfaktor -15%	Rohwert	Mit Korrekturfaktor -15%
16	2100 ± 420	1785 ± 357	470 ± 94	399 ± 80
22	600 ± 120	510 ± 102	276 ± 55	235 ± 47
26	245 ± 49	208 ± 42	207 ± 41	176 ± 35

Tabelle 17: Arithmetische Korrektur der geometrischen Abschattung

Wenn die Auswertung unter Verwendung dieser Daten erfolgt, so findet man nur graduelle Änderungen, das Gesamtbild ändert sich nicht wesentlich.

Folgende Änderungen treten bei der Auswertung des Brennlinsenreflektors auf:

Im Vergleich der Blendenstellungen ergeben sich zwei Änderungen, bei 16 kV überlappen sich die Fehlergrenzen bei 40/100 und 40/160 nun, bei 26 kV nun bei 40/100 und 80/160.

Dadurch sinkt die Anzahl der sich nicht überlappenden Fehlerbereiche von 35 auf 33, entsprechend 61% statt 65%. In der Energiebetrachtung ändert sich die Überlappung der Fehlerbereiche bei 16 kV und bei 26 kV um 2.

In der Betrachtung des Abstands sinkt die Anzahl der sich nicht überlappenden Fehlerbereiche bei hohem Abstand von 12 auf 10 (66 auf 55%), und ist damit genau so groß wie bei geringem Abstand.

In der Frage, welche Blendenstellung den größten Effekt ausübt, ändert sich dadurch nichts.

Folgende Änderungen treten bei der Auswertung des Halbellipsoidreflektors auf:

Im Vergleich der Blendenstellungen ergeben sich zwei Änderungen, bei 16 kV überlappen sich die Fehlergrenzen bei 40/100 und 40/160 nicht mehr.

Dadurch steigt die Anzahl der sich nicht überlappenden Fehlerbereiche von 26 auf 27, entsprechend von 48% auf 50%. In der Energiebetrachtung ändert sich die Überlappung der Fehlerbereiche bei 16 kV, sie steigt von 11 auf 12, entsprechend von 61 auf 66%.

In der Betrachtung des Abstands steigt die Anzahl der sich nichtüberlappenden Fehlerbereiche bei hohem Abstand von 10 auf 11 (56% auf 61%).

In der Frage, welche Blendenstellung den größten Effekt ausübt, ändert sich die Plätze nicht.

Die Frage „Existiert ein Blendeneffekt“, kann für beide Reflektoren, unabhängig davon, ob die Rohdaten gemäß der geometrischen Abschattung korrigiert wurden, mit „ja“ beantwortet werden.

Es werden im Folgenden die Rohdaten als Grundlage der Auswertung benutzt, wo die Verwendung der korrigierten Daten zu Änderungen führen würde, sind diese ebenfalls dargestellt.

In beiden Auswertungen stellte sich der Effekt direkt von der Generatorspannung abhängig dar, bei höheren Energiestufen tritt er weniger in Erscheinung.

Es fällt auf, dass je höher die Energiestufe ist, die Varianz der Ergebnisse geringer wird. (16 kV Faktor 2 – 6; 22 kV Faktor 2,2 – 4,2, 26 kV Faktor 1,3 – 3,4). Eine mögliche Erklärung

hierfür dürfte in der für die Zertrümmerung eines Steins notwendigen Energie liegen, bei 16 kV ist die Energie an der untersten Grenze einer Steinerstörung. Müller zeigt 1990 in seiner Arbeit „Dornier –Lithotriptoren im Vergleich“ in der die klassischen Lithotriptoren HM₃ und HM_{3 mod} detailliert und ihre Effektivität ausführlich untersucht werden, dass in unteren Energiebereich, i.e.S. 16 kV, Schwellendrucke, also auch Schwellenenergien auftreten, unterhalb deren die Fragmentation von Kunststeinen deutlich ineffektiver wird (46). Zusätzlich können hier kleinere Ungenauigkeiten bei der Platzierung des Steins im Zielbereich, Trübung des Wassers durch Steinsand, Ungenauigkeit der Stoßwellenausbreitung durch extrafokale Plasmaentstehung die im Stein ankommende Energie so verändern, dass dieser Schwellenwert unterschritten wird. Dies kann insbesondere für den Brennlinsenreflektor zutreffen, da die Energie auf eine Linie dispergiert wird und die Energiedichte somit geringer als bei dem Halbellipsoidreflektor im F₂ ist. Je höher die Energiestufe desto geringer diese Effekte, da die Energie über der für eine Steinerstörung notwendigen Untergrenze liegt.

In der Literatur werden unterschiedliche Parameter benutzt, um die Energie zur Fragmentation eines Steins zu beschreiben. In den Arbeiten, die sich mit den Mechanismen der Steinfragmentation beschäftigen, werden je nach verwendetem Lithotripter entweder Fokaldrucke (mPa) in der Regel zwischen 10 und 30 oder kV (20 – 24) angegeben (12, 16, 43, 80, 82-84). Einzig die schon oben erwähnte Arbeit von Müller, beschäftigt sich am Rande mit der Minimalenergie, die zur Fragmentation eines Kunststeins notwendig ist (46). Die persönliche klinische Erfahrung zeigt, dass bei 16 kV nur ein sehr geringer Effekt zu erzielen ist. Dies korrespondiert mit der Faustregel: „100 STW auf einem Gipsstein entsprechen 1000 STW in vivo“ (66). Die in der Arbeit gefundenen Stoßwellenzahlen bei 16 kV (arithmetisches Mittel und Median) liegen bei dem Halbellipsoidreflektor bei 1045 / 995 STW, bei dem Brennlinsenreflektor bei 1287 / 1225 STW und zeigen eine geringe klinisch zu erwartende Fragmentationsleistung.

Der Einfluss der effektiven Entfernung bei dem Halbellipsoidreflektor ist unter Betrachtung seines Fokussierverhaltens – Fokussierung der Energie auf den geometrischen Fokus₂ eines Halbellipsoids zu diskutieren. Im fokusnächsten Meßpunkt (150mm; 6,6mm vor dem rechnerischen Fokus), tritt der Blendeneffekt am geringsten auf. Im reflektornahen Meßpunkt (110 mm, 46,6mm vor dem Fokus, findet er sich in 44%; im reflektorfernsten Meßpunkt (180mm, 23,4 mm hinter dem geometrischen Fokus) findet er sich in 61%.

Bei dem Brennlinsenreflektor ist der Einfluss des effektiven Abstands durch das andere Fokussierprinzip anders zu bewerten. Die Konstruktion des Brennlinsenreflektors zielt darauf hin, die von einem Punktstrahler abgegebene Energie auf gleichlange Abschnitte der Z-Achse (Achse Reflektor / Stein) zu projizieren. Alle drei Meßpunkte liegen im Bereich der Brennlinie, die von 80 bis 180 mm liegt. Die Meßpunkte 110 mm und 150 mm liegen jeweils 30 mm von den Grenzen der Brennlinie entfernt. Der Meßpunkt 110 mm + 30 mm, der Meßpunkt 150 mm – 30 mm. Der Meßpunkt 180 mm liegt auf dem Endpunkt der Brennlinie – 180 mm. In den extremen Meßpunkten ist der Effekt in 55%, im mittleren in 72 % nachzuweisen. Bei Verwendung der unkorrigierten Rohdaten bei 180 mm sogar 67%. Für den Halbellipsoidreflektor lässt sich sagen, dass der Blendeneffekt hinter dem Fokus zunimmt. Durch das grundlegend andere Prinzip der Fokussierung beim Brennlinsenreflektor, zeigt sich der Effekt deutlich entfernungsempfindlicher.

Welche Ursache könnte hierfür verantwortlich sein?

Am naheliegendsten erscheint die Überprüfung der schon oben angeführten Fehlerquellen zu sein.

Die Elektrodeneffekte Abbrand und extrafokale Plasmabildung geometrischer Abweichung von F_1 sind lange bekannt, und in ihrer Auswirkung sicher belegt.

Das verwendete Koppelmedium Ultraschallgel (blasenfrei) ist klinischer Standard, die Auswirkungen der Luftblasen im Strahlengang aber durch die Versuchsdurchführung eliminiert.

Der Einfluss von Schwebeteilchen in der Flüssigkeit des Versuchsaufbaus ist sicherlich gegeben, aber als Ursache für den festgestellten Blendeneffekt, der so konstant auftritt, kommt er nicht in Frage. Das Wasser wurde nach 4 – 5 Steinen gewechselt, also 1 – 2 Steine später als in der Vorschrift für den Performancetest. Dort war der Effekt in dem Gesamtfehler von 9% enthalten. Eine so starke Auswirkung, dass Unterschiede bis zur 6 fachen Stoßwellenzahl auftreten, ist eher unwahrscheinlich.

Eine Fehlpositionierung des Stein hat bei geringer kV Anzahl und damit kleiner Fokalzone möglicherweise größere Auswirkungen, da aber bei steigenden kV das Fokalvolumen steigt wird die Fragmentation dadurch unempfindlicher. Das Verhalten des Blendeneffekts – Verringerung bei zunehmender kV Zahl würde dazu passen, jedoch verlangt dies, dass alle Steine nicht korrekt platziert waren, dies ist aber durch die Versuchsdurchführung, optische Peilung an mehreren Achsen auszuschließen.

Dass die Stoßwelle bei größerem Koppelabstand (hier + 40 mm) diese Strecke in optimal leitendem Medium verläuft, hätte bei einem relevanten Einfluss die notwendigen Stoßwellenanzahlen bei allen Meßpunkten mit Koppelabstand 80 mm gegenüber 40 mm sinken lassen, dies ist jedoch nicht der Fall. Nur in 21 von 36 Fällen (58%) ist die Stoßwellenanzahl bei dem Koppelabstand 80 niedriger als bei dem Koppelabstand 40, somit kann dies den Effekt ebenfalls nicht erklären.

Der Fehler beim Auswiegen der Steine ist eher einseitig, in Richtung Vergrößerung des Abtrags (Verlust von Steinmaterial bei Manipulation (Ausklopfen / Trocknen / Wiegen) zu erwarten, er würde eine höhere Effektivität vorspiegeln. Der Blendeneffekt zeigt sich aber am Deutlichsten bei niedriger Energie / schlechter Fragmentationsleistung. Der Fehler würde den Blendeneffekt eher verschleiern, als ihn auslösen.

Der „Fehlerring“ ist in seinem Ausmaß, gemessen an den Blendenunterschieden zu gering, um einen solchen Effekt auszulösen, die geometrische Abschattung ist in ihren Auswirkungen schon weiter oben beleuchtet worden, ihr Einfluss ändert den Effekt nicht.

Die Überprüfung der bekannten Fehlerquellen ergab keinen Aufschluss über die mögliche Ursache des Blendeneffekts.

Ein möglicher Ansatz ist in den Theorien zum Mechanismus der Steinfragmentation zu finden. Eisenmenger findet in den experimentellen Untersuchungen einen hohen Anteil des Quetscheffekts an der Steinfragmentation, der je größer der Stein um so deutlicher ausgeprägt ist (12). Er untersucht Steine mit einem Durchmesser von 5, 12 und 15 mm. Bei 12 mm Durchmesser ist die theoretische wie praktische Fragmentationsleistung durch den Quetscheffekt ca. 4 mal so hoch wie die theoretische Fragmentationsleistung durch

Fragmentation durch innere Reflektion im Stein (Hopkinson Effekt). Dies deutet auf die Wichtigkeit der Anteile der Wellenfront hin, die den Stein seitlich passieren. Durch die Blenden könnten Teile der Wellenfront durch Reflektionen gestört werden und so die Fragmentationsleistung herabsetzen.

Eine weitere Möglichkeit könnte in der Eigenschaft „schallweich“ der Blende liegen.

Eine akustische Längswelle breitet sich in einem Medium aus. Die Ausbreitung wird durch die Schallkennimpedanz beschrieben. Es ist das Produkt aus der Schallgeschwindigkeit (m/s) in dem betreffenden Material und der Dichte des Mediums (kg/m³). Da die Schallgeschwindigkeit je nach Temperatur unterschiedlich ist, zum Beispiel ausgeprägt bei Luft (-10° 324 m/s; +20° 343 m/s) oder Wasser (0° 1407 m/s; 20° 1484 m/s), ist auch die Schallkennimpedanz (Ns/m³) temperaturabhängig. So beträgt die Schallkennimpedanz von Luft bei 20° 442,47 Ns/m³, von Wasser 1,484 x 10⁶ Ns/m³, von Stahl bei 28 x 10⁶ Ns/m³. Beim Übergang von einem Medium zu einem anderen tritt eine Impedanzänderung auf. Wenn die Schallwelle von einem Körper mit geringer Schallkennimpedanz in einen Körper mit höherer Schallkennimpedanz eintritt, kommt es zu einer schallharten Reflektion der Schallwelle. Die Druckwelle bleibt als Druckwelle erhalten und wird nach Einfallswinkel = Ausfallswinkel reflektiert. Im Reflektor tritt dies regelhaft auf, wenn die Energie vom Reflektor auf die Brennpunktlinie resp. in den Fokus F₂ reflektiert wird. Im umgekehrten Fall, wenn von einem Medium mit höherer Schallkennimpedanz, die Welle in ein Medium mit geringerer Schallkennimpedanz eintritt, wird die Welle als Zugwelle reflektiert.

In Fall einer Koppelsituation kann der Rand der Koppelfläche – Luft als schallweiche Blende im Gegensatz zum Wasser des Koppelbalgs aufgefasst werden. Hier treffen zwar nicht die im Reflektor schallhart reflektierten, fokussierten Druckwellen sondern vor allem direkte Druckwellen auf, diese werden dann an der Grenze Wasser / Luft schallweich reflektiert und so zu Zugwellen. Die Grenze Luft / Wasser (durch den Koppelbalg noch weiter differenziert) ist nicht so glatt wie der Reflektor, es könnte zu nicht vorhersehbaren Interferenzen kommen, die in nicht vorhersehbarer Weise Lössungen oder Verstärkungen der Druck und – Zugwellen bewirken.

Wenn die Energie zur Fragmentation gerade ausreicht, kann dieser Effekt die zur Fragmentation zur Verfügung stehende Energie soweit verringern, dass der Stein nur sehr schlecht fragmentiert; bei anderem Ausgang kann die Fragmentationsenergie ansteigen.

Bei höherer Gesamtenergie bleibt auch bei deutlichem Energieverlust noch ausreichend Energie um den Stein zu fragmentieren.

Die weitergehende theoretische Bearbeitung, insbesondere die dafür notwendigen experimentellen Untersuchungen sind eine Aufgabe, die deutlich über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen.

5.3.Klinische Aspekte:

Die Koppelsituation, der Blende der vorliegenden Arbeit entsprechend, spielt bei den herkömmlichen Lithotriptoren nahezu keine Rolle, da durch den fixen Abstand Reflektoroberkante / Stein, die unterschiedliche Steintiefe von der Haut durch den Koppelbalg ausgeglichen werden muss und so kaum Variationen in der Koppel / Blendensituation auftreten können. Dies ist auch der Ortungsphilosophie (Fadenkreuz) geschuldet. Das Lithospace Lithotripsie System ermöglicht aber die Energie auf eine Brennlinie zu fokussieren, und erreicht so zum einen eine größerer maximale Behandlungstiefe, als auch eine höhere Flexibilität in der Steinpositionierung, eine Steindesintegration ist in einer langen Fragmentationszone möglich. Hier ist auch die Philosophie der Geräteherstellers im Ortungssystem (Fokalzone vs. Fokuskreuz) zu sehen.

Bei dem Übertragen der Versuchsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass Stoßwellenanzahlen größer 400, nach der Faustregel: 100 Stoßwellen im Versuchstopf entsprechen 1000 im Menschen, viele der erhobenen Messwerte für die klinische Bewertung sehr kritisch gesehen werden müssen. Ebenso ist die Energiestufe 16 kV klinisch nur als Einstiegsenergiestufe zu sehen, eine Steinbehandlung ohne Energiesteigerung, ist allein durch den Elektrodenabbrand letztlich nicht möglich. Die Meßpunkte mit 22 und 26 kV entsprechen der Situation einer ESWL viel eher.

Um der Frage nachzugehen, ob bei dem Brennlinsenreflektor ein Blendeneffekt sich nachweisen lässt, müssen Meßpunkte an der Spitze, in der Mitte und am Ende der Fokalzone des Brennlinsenreflektors gewählt werden; um einen Vergleich mit dem Standardtyp Lithotripter zu erhalten, müssen Messungen bei einem Halbellipsoidreflektor an diesen Punkten durchgeführt werden, obwohl diese klinisch nie verwendet werden können, da die Ortungssysteme dies nicht erlauben. Eine klinische Vergleichbarkeit ist deshalb nur bei den Meßpunkten 150 mm effektiver Abstand Stein / Reflektoroberkante, 22 und 26 kV gegeben.

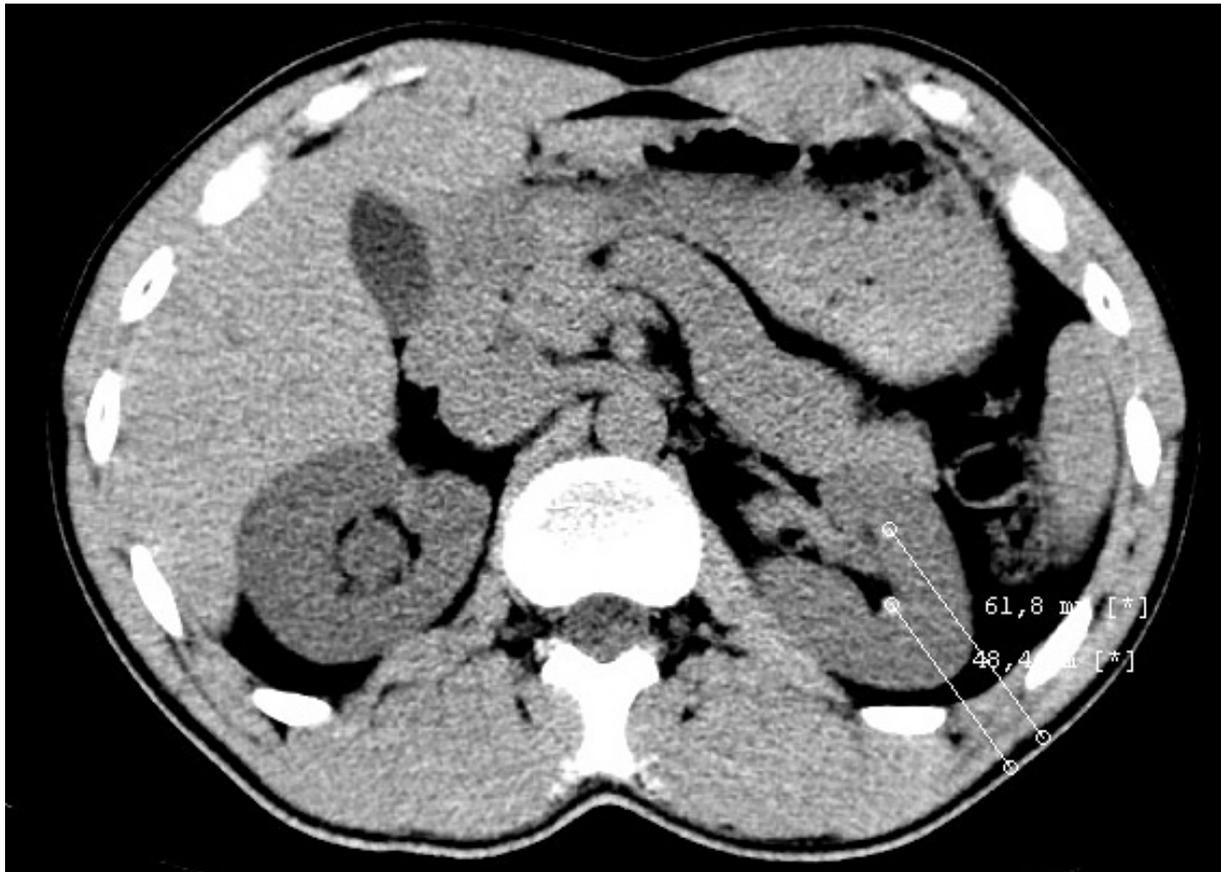


Abbildung 78: Schlanker Patient, oberflächlicher Steinsitz

Die Blendenstellung 80 mm Koppelabstand / 100 mm Koppelfläche entsprechen klinisch einen nicht so tiefen Steinsitz (70 mm ab Haut) und einem schlanken Patienten oder einer schlechten Ankoppelung (Abb. 78); die Blendenstellung 80 mm Koppelabstand / 160 mm Koppelfläche einem adipöseren Patienten, resp. einer besseren Ankoppelung (Abb.79). Ein schlanker Patient ist bei der epidemiologischen Situation des Steinleidens (generelle Zunahme der Adipositas, Korrelation Adipositas und Prävalenz Steine) eher seltener als eine schlechte Ankoppelung.

So zeigt sich bei einem oberflächlicheren Steinsitz 70 mm Tiefe ab Hautniveau, Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 100 mm zwischen dem Halbellipsoidreflektor $470 (\pm 94)$ STW und dem Brennliniereflektor $382 (\pm 76)$ bei 22 kV sowie bei 26 kV [$224 (\pm 45)$; $169 (\pm 34)$] eine Tendenz zugunsten des Brennlinienreflektors. Ebenso bei der Koppelfläche 160 mm, adipöserer Patient, bessere Ankoppelung, auch hier war der Brennlinienreflektor tendenzmäßig besser: Bei 22 kV $156 (\pm 31)$ STW vs. $209 (\pm 42)$ STW, bei 26 kV $89 (\pm 18)$ STW vs. $118 (\pm 24)$ STW.



Abbildung 79: Adipöser Patient, tiefer Steinsitz

Die Blendenstellung 40 mm Koppelabstand / 100 mm Koppelfläche entsprechen klinisch einen tiefen Steinsitz und einem schlanken Patienten oder einer schlechten Ankopplung ; die Blendenstellung 40 mm Koppelabstand / 160 mm Koppelfläche einem adipöseren Patienten , resp. einer besseren Ankopplung.

So zeigt sich bei einem tiefen Steinsitz 110 mm Tiefe ab Hautniveau, Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 100 mm zwischen dem Halbellipsoidreflektor $240 (\pm 48)$ STW und dem Brennliniereflektor $279 (\pm 56)$ bei 22 kV sowie bei 26 kV [$175 (\pm 35)$; $219 (\pm 38)$] kein wirklicher Unterschied. Anders jedoch bei der Koppelfläche 160 mm, adipöserer Patient, bessere Ankopplung: hier ist der Brennlinienreflektor deutlich besser: Bei 22 kV $129 (\pm 26)$ STW vs. $286 (\pm 62)$ STW, bei 26 kV $62 (\pm 12)$ STW vs. $158 (\pm 32)$ STW.

Bei extrem tiefem Steinsitz (größer 145 mm ab Haut, [Abb. 79]) kann der Halbellipsoidreflektor bedingt durch das Ortungskonzept nicht mehr eingesetzt werden, mit dem Brennlinsenreflektor wäre eine Steinfragmentation bei Steinsitz 140 mm, Koppelabstand 40 mm (effektiver Abstand 180mm) und einer schlechten Ankopplung bei 26 kV mit $245 (\pm 49)$ STW, bei guter Ankopplung (Kopffläche 160 mm) bei 22 kV mit $174 (\pm 35)$ STW und bei 26 kV mit $176 (\pm 35)$ STW noch möglich.

Zusammenfassend lässt sich bei der klinischen Bewertung eine etwas bessere Effizienz des Brennlinsenkonzepts zeigen, insbesondere ist die höhere effektive Eindringtiefe perspektivmäßig als Vorteil zu bewerten.

6. Zusammenfassung

Ausgehend von der klinische Beobachtung, dass bei der Anwendung des Lithospace© – Lithotripsie Systems, die Koppelsituation Einfluss auf das Lithotripsieergebnis haben könnte, werden systematische in vitro Versuche durchgeführt.

Die Versuche zeigen das Vorhandensein eines Blendeneffekts, der Koppelsituation eines Lithotriptors entsprechend, der die Fragmentationsleistung sowohl des Halbellipsoidreflektors als auch des Brennlinierelektors beeinflusst. Der Effekt tritt bei beiden Reflektoren bei niedrigen Energiestufen deutlicher auf. Bei dem Halbellipsoidreflektor tritt der Effekt mit Abstand zum Fokus deutlicher auf. Beim Brennlinierelektor ist der Blendeneffekt nicht sicher an die Entfernung Reflektor / Stein gebunden.

Bei bestimmungsgemäßer Anwendung eines Lithotriptors mit Halbellipsoidreflektor wird der Stein in den Fokus F_2 gebracht, dort ist der Blendeneffekt gering ausgeprägt. Die Koppelsituation ist durch den fixen Abstand Reflektor - Fokus kaum beeinflussbar. Bei der niedrigen Energiestufe von 16 kV ist der Blendeneffekt zwar am deutlichsten ausgeprägt, die Energiestufe ist zur Fragmentation von Steinen jedoch auch relativ ungeeignet. Eine Eskalation der kV Zahl in den Bereich über zwanzig erscheint aus diesem Blickwinkel sinnvoll (46).

Klinisch sind diese Ergebnisse für den Lithospace – Lithotriptor relevant, da bei ihm aufgrund der Brennlinie die Koppelsituation vom Anwender deutlich beeinflusst werden kann. Durch die Brennlinie kann der Stein in einem variablen Abstand vom Reflektor behandelt werden. Die Koppelsituation sollte, wenn möglich so gestaltet werden, dass der Abstand und die Koppelfläche groß sind. Das ist leider nicht sehr häufig möglich. Es sollte eher auf eine große Koppelfläche als auf einen großen Koppelabstand geachtet werden. Die Kombination niedriger Koppelabstand und kleine Koppelfläche ist den Daten nach am ungünstigsten. Eine breite Koppelfläche mit höheren Stoßwellenenergien verringert den Blendeneffekt.

Der Blendeneffekt sollte in weiteren Untersuchungen näher untersucht werden.

7. Literaturverzeichnis

1. **Ahlstrand, C., and H. G. Tiselius.** 1990. Recurrences during a 10-year follow-up after first renal stone episode. *Urol.Res.* **18**:397-399.
2. **Bateson, E. M.** 1973. Renal tract calculi and climate. *Med. J. Aust.* **2**:111-113.
3. **Beck, E. M., and R. A. J. Riehle.** 1991. The fate of residual fragments after extracorporeal shock wave lithotripsy monotherapy of infection stones. *J.Urol* **145**:6-9.
4. **Bergsdorf, T.** 2010. Presented at the 1st International EAU - eULIS Comprehensive Urolithiasis Workshop Barts and The London NHS Trust.
5. **Bichler, K.-H., F. Porzolt, and K. Naber.** 1972. Proteinurie unter körperlicher Belastung. *DMW* **34**:1229-1234.
6. **Blacklock, N. J.** 1969. The pattern of urolithiasis in the Royal Navy, p. 33-47. *In* A. Hodgkinson and B. E. C. Nordlin (ed.), *Renal Stone Research Symposium*. J & A Churchill, London.
7. **Chaussy, C. H., W. Brendel, and E. Schmied.** 1980. Extracorporeally induced Destruction of Kidney Stones by Shock Waves. *Lancet*:1265-1268.
8. **Clark, J. Y.** 1990. Renal calculi in army aviators. *Aviat. Space Environ. Med.* **61**:744-747.
9. **Coleman, A. J., Saunders, J.E., Crum, L.A., Dyson, M.** 1987. Acoustic cavitation generated by an extracorporeal shock wave lithotripter. *Ultrasound in Med. & Biol* **13**:69-76.
10. **Crum, L. A.** 1988. Cavitation Microjets As A Contributory Mechanism For Renal Calculi Desintegration in ESWL. *J. Urol* **140**:1587-1590.
11. **Curhan, G. C., W. C. Willett, E. B. Rimm, F. E. Speizer, and M. J. Stampfer.** 1998. Body size and risk of kidney stones. *J. Am.Soc.Nephrol.* **9**:1645.
12. **Eisenmenger, W.** 2001. The Mechanisms of stone fragmentation in ESWL. *Ultrasound in Med. & Biol* **27**:683 - 693.
13. **Evan, A. P., J. E. Lingeman, and F. L. Coe.** 2003. Randall's plaque of patients with nephrolithiasis begins in basement membranes of thin loops of Henle. *J.Clin.Invest.* **111**:607-616.
14. **Evans, K., and R. A. Costabile.** 2005. Time to development of symptomatic urinary calculi in a high risk environment. *J.Urol* **173**:858-861.
15. **Gault, M. H., and L. Chafe.** 2000. Relationship of frequency, age, sex, stone weight and composition in 15.624 stones: comparison of results from 1980 to 1983 and 1995 to 1998. *J.Urol* **164**:302-307.

16. **Gracewski, S. M., G. Dahake, Z. Ding, S. J. Burns, and E. C. Everbach.** 1993. Internal stress wave measurements in solid subjected to lithotripter pulses. *J. Acoust. Soc. Am.* **94**:652 - 661.
17. **Halachmi, S., M. Nagar, S. Golan, Y. Ginesin, and S. Meretyk.** 2006. Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy for large Ureteral Stones using HM3 Lithotripter. *J.Urol* **176**:1449-1452.
18. **Heimbach, D., J. Jacobs, A. Hesse, S. C. Müller, P. Zhong, and G. M. Preminger.** 2000. Physikalische Eigenschaften künstlicher Harnsteine aus natürlichen Materialien (Bon(n)-Stones) im Vergleich zu natürlichen und anderen künstlichen Harnsteinen. *J.Urol. Urogynäkol* **7**:11-20.
19. **Hesse, A., E. Brändle, D. Wilbert, K. U. Köhrmann, and P. Alken.** 2003. Study on the prevalence and incidence of urolithiasis in Germany comparing the years 1979 vs. 2000. *Eur.Urol.* **44**:709- 713.
20. **Hesse, A., and R. Siener.** 1997. Current aspects of epidemiology and nutrition in urinary stone disease. *World J. Urol.* **15**:165-171.
21. **Holmes, R. P., D. G. Assimos, and H. O. Goodman.** 1998. Molecular basis of inherited renal lithiasis. *Curr.Opin.Urol.* **8**:315-319.
22. **Hossain, R. Z., Y. Ogawa, S. Hokama, M. Morozumi, and T. Hatano.** 2003. Urolithiasis in Okinawa,Japan: a relatively high prevalence of uric acid stones. *Int. J. Urol.* **10**:411-414.
23. <http://de.wikipedia.org/wiki/Arginin> 2009,. Arginin (zuletzt abgerufen 22.02.2013)
24. <http://de.wikipedia.org/wiki/Cystin>. 2009. Cystin. (zuletzt abgerufen 22.02.2013)
25. <http://de.wikipedia.org/wiki/Dornier-Nierensteinzertr%C3%BCmmerer>. 2012. Dornier-Nierensteinzertrümmerer (zuletzt abgerufen 22.02.2013)
26. **Ibrahim, A., M. Zein, and O. Beleil.** 1977. Uric acid lithiasis in the Sudan. *J.Trop.Med.Hyg.* **80**:173-176.
27. **Ito, H., T. Kotake, K. Nomura, and M. Masai.** 1995. Prevalence of urolithiasis in Kaizuka City, Japan - an epidemiologic study of urinary stones. *Eur.Urol.* **27**:324-328.
28. **Jain, A., and T. Shah.** 2007. Effect of air bubbles in the coupling medium on efficacy of extracorporeal shock wave lithotripsy. *Eur.Urol.* **51**:1680-1687.
29. **Jarrar, K., R. H. Boedeker, and W. Weidner.** 1996. Struvite stones: long term follow up under metaphylaxis. *Ann.Uro.,paris* **30**:113-117.

30. **Jenkins, A. D.** 1991. Extracorporeal shock wave lithotripsy of renal stones. *In* M. Marberger, J. M. Fitzpatrick, A. D. Jenkins, and C. Y. Pak (ed.), *Stone Surgery*. Churchill Livingstone, Edinburgh.
31. **Johnson, C. M., D. M. Wilson, and W. M. O'Fallon.** 1979. Renal stone epidemiology: A 25 year study in Rochester, Minnesota *Kidney Int* **16**:624-631.
32. **Joost, J.** 1985. *Das Harnsteinleiden in Tirol, Veröffentlichungen der Universität Innsbruck* ed, Innsbruck.
33. **Keeley jr, F. X.** 2007. Editorial Comment: Effect of air bubbles in the coupling medium on efficacy of extracorporeal shock wave lithotripsy *Eur.Urol.* **51**:1686-1687.
34. **Kierfeld, G.** 2008. Persönliche Kommunikation: Asymptomatische Harnsteine.
35. **Kim, S. C., Y. T. Moon, Y. P. Hong, T. K. Hwang, S. H. Choi, K. J. Kim, C. K. Sul, T. C. Park, Y. G. Kim, and K. S. Park.** 1998. Prevalence and risk factors of urinary stones in Koreans. *J.Korean Med.Sci.* **13**:138-146.
36. **Knoll, T.** 2009. Leitlinien zur Diagnostik, Therapie und Metaphylaxe der Urolithiasis Nr.043/025. *In* AWMF (ed.).
37. **Koide, T., T. Oka, M. Takaha, and T. Sonoda.** 1986. Urinary tract stone disease in modern Japan. Stone incidence, composition and possible causes in Osaka district. *Eur. Urol.* **13**:403-407.
38. **Lahme, S., K. H. Bichler, T. Eggermann, and F. Lang.** 2002. Genomic and functional investigations of mutations of the SLC31A gene in cystinuria. *Urol.Int.* **69**:207-211.
39. **Leusmann, D. B., R. Blaschke, and W. Schmandt.** 1990. Results of 5.035 stone analyses: a contribution to epidemiology of urinary stone disease. *Scan.J.Urol.Nephrol.* **24**:205-210.
40. **Liebler, M.** 2006. *ESWL - Device EPL Report on Sound Field Measurements Institut für Höchsthfrequenztechnik und Elektronik Universität Karlsruhe (TH).*
41. **Lingemann, J. E.** 2003. Editorial: Extracorporeal shock wave lithotripsy -What happened? *J.Urol* **169**:63.
42. **Ljunghall, S., and B. G. Danielson.** 1984. A prospective study of renal stone recurrences. *Br.J.Urol.* **56**:132-134.
43. **Lokhandwalla, M., and B. Sturtevant.** 2000. Fracture mechanics model of stones comminution in ESWL and implications for tissue damage. *Phys. Med. Biol.* **45**:1923 - 1940.

44. **Martinez-Pineiro, J. A., E. G. de Iriarte, and A. H. Amero.** 1982. The problem of recurrence and infection after surgical removal of staghorn calculi. *Eur.Urol* **8**:94-101.
45. **Michaels, E. K., Y. Nakagawa, and N. Miura.** 1994. Racial variation in gender frequency of calcium urolithiasis. *J.Urol* **152**:2228-2231.
46. **Müller, M.** 1990. Dornier - Lithotripter im Vergleich. Vermessung der Stoßwellenfelder und Fragmentationswirkungen *Biomed. Technik* **35**:250-262.
47. **Najem, G. R., J. J. Seebode, A. J. Samady, M. Feuermann, and L. Friedman.** 1997. Stressful life events and risk of symptomatic kidney stones. *Int. J. Epidemiol* **26**:1017-1023.
48. **Pak, C. Y., K. Sakhaee, and C. Fuller.** 1986. Successful management of uric acid nephrolithiasis with potassium citrate. *Kidney Int* **30**:422-428.
49. **Parry, E. S., and I. S. Lister.** 1975. Sunlight and hypercalciuria. *Lancet*:1063-1056.
50. **Pearle, M. S., E. A. Calhoun, and G. C. Curhan.** 2005. Urologic Diseases in America Project: Urolithiasis *J.Urol* **173**:848-857.
51. **Pierce, L. S., and B. Bloom.** 1945. Observations on urolithiasis among American troops in a desert area. *J.Urol* **54**.
52. **Pishchalnikov, Y. A., J. S. Neucks, R. J. VonDerHaar, I. V. Pishchalnikova, J. C. Williams, and J. A. McAteer.** 2006. Air pockets trapped during routine coupling in dry head lithotripsy can significantly decrease the delivery of shock wave energy. *J.Urol* **176**:2706-2710.
53. **Prince, C. L., and P. L. Scardino.** 1960. A statistical analysis of ureteral calculi. *J.Urol* **83**:561-565.
54. **Prince, C. L., P. L. Scardino, and C. T. Wolan.** 1956. The effect of temperature, humidity and dehydration on the formation of renal calculi. *J.Urol* **75**:209-215.
55. **Robertson, W., and H. Hughes.** 1994. Epidemiology of urinary stone disease in Saudi - Arabia, p. 453 -455. *In* R. Ryall, R. Bais, V. Marshall, A. Rofe, L. Smith, and V. Walker (ed.), *Urolithiasis*. Plenum Press, New York, London.
56. **Robertson, W. G., P. J. Heybourn, M. Peacock, F. A. Hanes, and R. Swaminathan.** 1979. The effect of high animal protein intake on the risk of calcium stone-formation in the urinary tract. *Clin.Sci (Lond)* **57**:285-288.
57. **Robertson, W. G., D. B. Morgan, D. H. Marshall, M. Peacock, and B. E. C. Nordin.** 1977. Risk factors in stone formation. *In* G. Gasser and W. Vahlensiek (ed.), *Pathogenese und Klinik der Harnsteine* V. Steinkopff, Darmstadt.

58. **Robertson, W. G., M. Peacock, and A. Hodgkinson.** 1979. Dietary changes and the incidence of urinary calculi in the U.K. between 1958 and 1976. *J.Chronic.Dis.* **32**:469-476.
59. **Rodmann, J. S.** 1991. Prophylaxis of uric acid stones with alternate day doses of alkaline potassium salts. *J.Urol* **145**:97-99.
60. **Sarmina, I., J. P. Spirnak, and M. I. Resnick.** 1987. Urinary lithiasis in the black population: An epidemiological study and review of the literature. *J.Urol* **138**:14-17.
61. **Scales, C. D., L. H. Curtis, and W. P. Springhart.** 2005. Changing gender prevalence of nephrolithiasis. *J.Urol* **173(Suppl)**:298.
62. **Schneider, H. J., and C. Berg.** 1981. Epidemiologische Aussagen zum Harnsteinleiden auf der Grundlage von 100.000 Harnsteinanalysen unter besonderer Berücksichtigung der Rezidive. *Fortschr.Urol.Nephrol.* **17**:34-39.
63. **Schubert, G., M. V. Chudnovskaia, G. Brien, M. T. Tynaliev, N. N. Popovkin, and A. R. Timin.** 1990. The characteristics of the chemical composition and structure of urinary stones and their prevalence in the cities of Moscow, Berlin and of the Kirghiz SSR. *Urol.Nephrol. (Moskau)*:49-54.
64. **Schumann, H. J.** 1963. Die Häufigkeit der Urolithiasis im Sektionsgut des Pathologischen Instituts St. Georg. Leipzig. *Zentralbl Allg Pathol* **105**:88.
65. **Schwarze, W.** 2009. Lithotripsie. *In* E. Wintermantel and S.-W. Ha (ed.), *Medizin Technik: Life Science Engineering.* Springer.
66. **Schwarze, W.** 2008. Persönliche Kommunikation: Übertragung STW Anzahl vom Gipsstein - Modell zur in Vivo Situation
67. **Soucie, J., R. Coates, W. McCellan, W. Austin, and M. Thun.** 1996. Relation between geographic variability in kidney stones prevalence and risk factors for stones. *Am J. Epidemiol* **143**:487 - 495.
68. **Soucie, J. M., M. J. Thun, and R. J. Coates.** 1994. Demographic and geographic variability of kidney stones in the United States. *Kidney Int* **46**:893-899.
69. **Stamatelou, K. K., M. E. Francis, and C. A. Jones.** 2003. Time trends in reported prevalence of kidney stones in the United States: 1976 - 1994. *Kidney Int* **63**:1817-1823.
70. **Sternberg, K., S. Greenfield, P. Williot, and J. Wan.** 2005. Pediatric stone disease: an evolving experience. *J.Urol* **174**:1711 - 1714.
71. **Strohmaier, W. L.** 2000. Course of calcium stone disease without treatment. What can we expect? *Eur.Urol.* **37**:339-344.

72. **Strohmaier, W. L.** 1993. Harnsteingenesse. *Urologe B* **33**:6-9.
73. **Strohmaier, W. L., K. H. Bichler, M. Schmid, G. Schlegel, and M. Schreiber.** 1988. Das Tübinger Harnsteinregister, p. 17-21. *In* G. Gasser and W. Vahlensieck (ed.), *Pathogenese und Klinik der Harnsteine XIII*. Steinkopf, Darmstadt.
74. **Strohmaier, W. L., and A. Weigl.** 1997. Stone composition in upper Franconia - unusually high percentage of uric acid lithiasis., p. 10-11. *In* P. Jungers and M. Daudon (ed.), *Renal stone disease*. Elsevier Science, Amsterdam, New York.
75. **Sutherland, J. W., J. H. Parks, and F. L. Coe.** 1985. Recurrence after a single renal stone in a community practice. *Miner.Electrolyte Metab* **11**:267-269.
76. **Taylor, E. N., M. J. Stampfer, and G. C. Curhan.** 2005. Obesity, weight gain, and the risk of kidney stones. *JAMA* **293**:455-462.
77. **Teichman, J. M. H., A. J. Portis, P. P. Cecconi, W. L. Bub, R. C. Endicott, B. Denes, M. S. Pearle, and R. V. Clayman.** 2000. In Vitro Comparison of Shock wave Lithotripsy Machines. *J.Urol* **164**:1259-1264.
78. **Wein, A. J., L. R. Kavoussi, A. C. Novik, A. W. Partin, and C. A. Peters (ed.).** 2007. *Campbell-Walsh Urology*.
79. **Wendt-Nordahl, G., A. P. Evan, M. Spahn, and T. Knoll.** 2008. Kalziumoxalatsteinbildung. Neue pathogenetische Aspekte einer alten Erkrankung. *Urologe* **47**:538-544.
80. **Xi, X., and P. Zhong.** 2001. Dynamic photoelastic study of the transient stress field in solids during shock wave lithotripsy. *L. Acoust. Soc. Am.* **109**:1226 - 1239.
81. **Yoshida, O., A. Terai, T. Ohkawa, and OkadaY.** 1999 National trend of the inzidence of urolithiasis in Japan from 1965 to 1995. *Kidney Int* **56**:1899 - 1904.
82. **Zhong, P., and C. J. Chuong.** 1993. Propagation of shock waves in elastic solids caused by cavitation microjet impact. I: Theoretical formulation. *J. Acoust. Soc. Am.* **94**:19 - 28.
83. **Zhong, P., C. J. Chuong, and G. M. Preminger.** 1993. Propagation of shock waves in elastic solids caused by cavitation microjet impact. II: Application in extracorporeal shock wave lithotripsy. *J. Acoust. Soc. Am.* **94**:29 - 36.
84. **Zhong, P., Y. Zhou, and S. Zhu.** 2001. Dynamics of bubble oscillation in constrained media and mechanisms of vessel rupture in swl. *Ultrasound in Med. & Biol* **27**:119-134.

8. Anhang

8.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Steinarten.....	16
Tabelle 2: Therapieempfehlung Leitlinie 2009.....	21
Tabelle 3: Druck / Fokalvolumen einiger Lithotriptoren (mod. nach Campbell-Walsh Urology (78), Schwarze (65)).....	29
Tabelle 4: Eigenschaften des Kunststeins AST0118.....	50
Tabelle 5: Ergebnisse Brennlinsenreflektor (Rohdaten)	67
Tabelle 6: Ergebnisse nach geometrischer Korrektur Brennlinsenreflektor.....	68
Tabelle 7: Ergebnisse Halbellipsoidreflektor (Rohdaten).....	69
Tabelle 8: Ergebnisse nach geometrischer Korrektur Halbellipsoidreflektor.....	70
Tabelle 9: Effektivität / Blendenstellung Brennlinsenreflektor (ohne Korrektur geometrische Abschattung)	103
Tabelle 10: Effektivität / Blendenstellung Brennlinsenreflektor (nach Korrektur geometrische Abschattung)	104
Tabelle 11: Gesamtübersicht Blendeneffekt Brennlinsenreflektor	104
Tabelle 12: Gesamtübersicht Wirksamkeit der Blendenstellung Brennlinsenreflektor	105
Tabelle 13: Effektivität / Blendenstellung Halbellipsoidreflektor (ohne Korrektur geometrische Abschattung)	113
Tabelle 14: Effektivität / Blendenstellung Halbellipsoidreflektor (nach Korrektur geometrische Abschattung)	114
Tabelle 15: Gesamtübersicht Blendeneffekt Halbellipsoidreflektor.....	115
Tabelle 16: Gesamtübersicht Wirksamkeit der Blendenstellung Halbellipsoidreflektor	115
Tabelle 17: Arithmetische Korrektur der geometrischen Abschattung	127

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlauf der Häufigkeit von Steinen im Sektionsgut Leipzig (64)	12
Abbildung 2: Prinzip der Fokussierung bei elektrohydraulischen Stoßwellenquellen (mod. nach Campbell-Walsh Urology (78)).....	24
Abbildung 3: Ortungsprinzip HM ₃ (mod nach Jenkins (30))	25
Abbildung 4: HM ₃ - Lithotripter (Fa. Dornier Medizintechnik, Germering).....	26
Abbildung 5: Prinzip der Fokussierung bei elektromagnetischen Stoßwellenquellen (mod. nach Campbell-Walsh Urology (78)).....	27
Abbildung 6: Prinzip der Fokussierung bei piezoelektrischen Stoßwellenquellen (mod. nach Campbell-Walsh Urology (78)).....	28
Abbildung 7: Koppelbalg Lithospace vollausgefahren / halbausgefahren / leer	30
Abbildung 8: Steinfragmentation durch Druckinhomogenitäten (mod. nach Eisenmenger (12)).....	32
Abbildung 9: Steinfragmentation durch Innere Reflektion, Hopkinson – Effekt.....	33
Abbildung 10:Steinfragmentation durch Kavitationseffekte (mod. nach Eisenmenger (12))	34
Abbildung 11: Steinfragmentation durch Quetscheffekt (mod. nach Eisenmenger (12))	35
Abbildung 12: Modell Steinfragmentation (nach Lokhandwalla und Sturtevant (43))	36
Abbildung 13: Oben : Elektrode neu, unten nach 3000 STW	37
Abbildung 14: Klinisch genutzter Lithospace® Lithotripter	38
Abbildung 15: Modifizierter Performancetopf / Testtopf auf dem Stoßwellenkopf.....	39
Abbildung 16: Blick von oben in den mod. Performancetopf / Testtopf, die braunen Streifen am Topf dienen zur Zentrierung der Steine in der Z - Achse.....	40
Abbildung 17: Detail mod. Performancetopf / Testtopf, 80 mm Abstand Membran / Oberkante Reflektor	41
Abbildung 18: Testaufbau: Steinalter mit grünem Steinnetz im wassergefüllten mod. Performancetopf / Testtopf	42
Abbildung 19: Netzmaterial, Maschenweite 2 mm.....	43
Abbildung 20: Schema eines Ellipsoids / Halbellipsoids mit den geometrischen Kennachsen, typischen Bezeichnungen und Entfernungen.....	44
Abbildung 21: Rekonstruktion der Energieverteilung am Beispiel des klassischen Halbellipsoids	45
Abbildung 22: Schema Brennlinsenreflektor	46

Abbildung 23: Druckkurve Brennlinsenreflektor bei 16 kV.....	47
Abbildung 24: Schema Halbellipsoidreflektor	48
Abbildung 25: Druckkurve im Fokalebereich HM ₃ -Typ (43)	49
Abbildung 26: Zwei Kunststeine AST 0118.....	50
Abbildung 27: Schlanker Patient mit Stein in ventraler und dorsaler Kelchgruppe, 61 mm resp. 48 mm Tiefe ab Hautniveau.....	52
Abbildung 28: Adipöser Patient mit Steinen in ventraler und dorsaler Kelchgruppe, 152 mm	52
Abbildung 29: Koppelabstand 40 mm und 80 mm ab Oberkante Reflektor.....	53
Abbildung 30: Kleine Koppelfläche, z.B. Kind, schlanker Patient, dorsaler Kelchstein, oberflächlicher Steinsitz.....	54
Abbildung 31: Breite Koppelfläche, z.B. adipöser Patient, ventraler Kelchstein / tiefer Steinsitz.....	54
Abbildung 32: Ausmaß der geometrischen Abschattung bei dem Brennlinsenreflektor durch die Ankoppelung, hier Abschattung bei Koppelabstand 40 mm und Blendenfläche 100 mm: ca. 15%	56
Abbildung 33: Ausmaß der geometrischen Abschattung bei dem Brennlinsenreflektor durch die Ankoppelung. Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 40 und 80 mm, hier ist keine Abschattung zu erwarten.....	57
Abbildung 34: Ausmaß der geometrischen Abschattung bei dem Halbellipsoidreflektor durch die Ankoppelung, hier Abschattung bei Koppelabstand 40 mm und Koppelfläche 100 mm: ca. 15%.	58
Abbildung 35: Ausmaß der geometrischen Abschattung bei dem Halbellipsoidreflektor durch die Ankoppelung, Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 40 mm und 80 mm. hier keine Abschattung.....	59
Abbildung 36: Blick in den Testtopf, schon mit Wasser gefüllt, Koppelfläche 100 mm Durchmesser, Luftpolsterfolienring am Platz, Koppelfläche noch nicht 100% luftblasenfrei	60
Abbildung 37: Koppelfläche 160 mm, Luftblasenfrei	61
Abbildung 38: Situation vor Beginn der Fragmentation.....	62
Abbildung 39: Detail Steinpositionierung: Steinlage 110 mm über Reflektor (70 mm über Membran Performancetopf + 40 mm Abstand Membran / Oberkante Reflektor), Stein zentriert , Blick etwas gedreht, um beide optischen Hilfslinien zu zeigen.....	63

Abbildung 40: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Koppelabstand 40 mm, Energiestufe: 26 kV, hier geometrische Abschattung (ca. 15%) Rohwerte und korrigierte Werte nebeneinander	72
Abbildung 41: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 40 mm, Energiestufe: 22 kV	73
Abbildung 42: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Koppelabstand 80 mm, Energiestufe: 26 kV	73
Abbildung 43: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Koppelabstand 80 mm, Energiestufe: 22 kV	74
Abbildung 44: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Effektiver Abstand 110 mm, 22 kV, hier geometrische Abschattung bei Koppelabstand 40 mm	75
Abbildung 45: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Effektiver Abstand 150 mm, 26 kV, hier geometrische Abschattung bei Koppelabstand 40 mm	76
Abbildung 46: Graphik: Koppelfläche 100 mm, Effektiver Abstand 180 mm, 22 kV, hier geometrische Abschattung bei Koppelabstand 40 mm	76
Abbildung 47: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Effektiver Abstand 110 mm, 26 kV ...	77
Abbildung 48: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Effektiver Abstand 150 mm, 22 kV ...	77
Abbildung 49: Graphik: Koppelfläche 160 mm, Effektiver Abstand 180 mm, 26 kV ...	78
Abbildung 50: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Effektiver Abstand 110 mm, 26 kV, hier geometrische Abschattung (ca. 15%) bei Koppelfläche (Durchmesser) 100 mm	79
Abbildung 51: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 22 kV, hier geometrische Abschattung (ca. 15%) bei Koppelfläche (Durchmesser) 100 mm	79
Abbildung 52: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 26 kV, hier geometrische Abschattung (ca. 15%) bei Koppelfläche (Durchmesser) 100 mm	80
Abbildung 53: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe: 22 kV	80
Abbildung 54: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 26 kV	81
Abbildung 55: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 22 kV	81

Abbildung 56: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 110, geometrische Abschattung (15%) bei allen Meßpunkten	82
Abbildung 57: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 150, geometrische Abschattung (15%) bei allen Meßpunkten.	83
Abbildung 58: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 180, geometrische Abschattung (15%) bei allen Meßpunkten.	83
Abbildung 59: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 110	84
Abbildung 60: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 150	84
Abbildung 61: Graphik: Koppelabstand 40 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 180	85
Abbildung 62: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 110	85
Abbildung 63: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 150	86
Abbildung 64: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 100, Effektiver Abstand 180	86
Abbildung 65: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 110	87
Abbildung 66: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 150	87
Abbildung 67: Graphik: Koppelabstand 80 mm, Koppelfläche 160, Effektiver Abstand 180	88
Abbildung 68: Graphik: Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe: 16 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung.....	89
Abbildung 69: Graphik: Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe: 22 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung.....	89
Abbildung 70: Graphik: Effektiver Abstand 110 mm, Energiestufe: 26 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung.....	90

Abbildung 71: Graphik: Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 16 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung.....	91
Abbildung 72: Graphik: Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 22 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung.....	92
Abbildung 73: Graphik: Effektiver Abstand 150 mm, Energiestufe: 26 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung.....	92
Abbildung 74: Graphik: Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 16 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung.....	93
Abbildung 75: Graphik: Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 22 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung.....	94
Abbildung 76: Graphik: Effektiver Abstand 180 mm, Energiestufe: 26 KV, 20% Fehlerintervall. Werte 40/100 korrigiert und unkorrigiert bei geometrischer Abschattung.....	95
Abbildung 77: Darstellung des Unterschieds der Laufstrecke der Stoßwelle in optimalem Ausbreitungsmedium je nach Koppelabstand, hier am Brennlinsenreflektor	124
Abbildung 78: Schlanker Patient, oberflächlicher Steinsitz	134
Abbildung 79: Adipöser Patient, tiefer Steinsitz.....	135

9. Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Konrad Erich Georg Lang
Adresse	Thielestraße 28
42389 Wuppertal	
Geburtsdatum	05.02.1961
Geburtsort	Bad Orb
Familienstand:	verheiratet seit 31.01.1992 mit Christine Lang, geb. Puls; Ärztin für Anästhesie Geburt des Sohnes Maximilian 25.03.1994 Geburt der Tochter Sibylle 19.11.1996 Geburt der Tochter Katharina 19.04.2000

Schulbildung

1967 - 1970	Grundschule Bad Orb
1970 - 1976	Gesamtschule Wächtersbach
1976 -1979	Grimmelshausen Gymnasium Gelnhausen
10.12.1979	Reifeprüfung

Studium

1980 -1985	Studium der Humanmedizin an der Johannes Gutenberg Universität Mainz
1985- 1986	Praktisches Jahr: Stadt Krankenhaus Worms
17.11.1986	Approbation

Zivildienst

1.12.1986 – 31.3. 1988
Zivildienst als Assistent der Klinik für Allgemein- und
Gefäßchirurgie
Diakoniekrankenhaus Schwäbisch Hall
Leitung: Prof. Dr.med. V. Lenner

Weiterbildung

01.05.1988 – 06.08.1995
Assistent an der Urologischen und
Kinder urologischen Klinik
Kliniken Wuppertal GmbH
Leitung: Prof. Dr. med. J.W. Thüroff

01.07.1991 – 30.06.1992
Assistent an der Urologischen Klinik der
Johannes-Gutenberg Universität Mainz
Leitung: Prof. Dr. med. Rudolf Hohenfellner

23.09.1992
Erwerb der Gebietsbezeichnung:
Arzt für Urologie

Seit 07.08.1995
Oberarzt in der Klinik für Urologie und Kinderurologie
des Klinikum Leverkusen gGmbH
Leitung: Prof. Dr. med. G. Kierfeld
Seit 01.04. 2001: PD Dr. med. J. Zumbé



Wuppertal, 23.02.2013

Konrad Lang

Herstellung: Fa ausdrucksweise,
Höhne 67, 42275 Wuppertal