

AUS DER ABTEILUNG
FÜR GEFÄßCHIRURGIE
PROF. DR. KARIN PFISTER
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

**Etablierung eines Simulationsmodells zur
kontrastverstärkten Ultraschalluntersuchung stumpfer und
penetrierender Nierenverletzungen**

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Christian Richter

2020

AUS DER ABTEILUNG
FÜR GEFÄßCHIRURGIE
PROF. DR. KARIN PFISTER
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

**Etablierung eines Simulationsmodells zur
kontrastverstärkten Ultraschalluntersuchung stumpfer und
penetrierender Nierenverletzungen**

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Christian Richter

2020

Dekan: Prof. Dr. Dirk Hellwig

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Karin Pfister

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Bernhard Banas

Tag der mündlichen Prüfung: 18. August 2020

Für Birgit

„Erschallet, ihr Lieder, erklinget, ihr Saiten!“

Johann Sebastian Bach, BWV 172, 1

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	7
1.1. DIAGNOSTISCHER STELLENWERT DER KONTRASTMITTELSONOGRAPHIE BEIM ABDOMINALTRAUMA	7
1.2. FRAGESTELLUNG	10
2. MATERIAL UND METHODE.....	12
2.1. KADAVERNIEREN.....	12
2.1.1. <i>Herkunft der Kadavernieren</i>	12
2.1.2. <i>Ethische Überlegungen</i>	13
2.1.3. <i>Mögliche Kontaminationen und Infektionsgefährdung</i>	13
2.1.5. <i>Entsorgung der Kadavernieren</i>	13
2.1.6. <i>Präparation, Spülung und Transport der Kadavernieren</i>	14
2.1.7. <i>Vorbereitungen zur Ultraschalluntersuchung</i>	17
2.2. ULTRASCHALLSYSTEM.....	20
2.3. KONTRASTMITTELVERSTÄRKER	21
2.4. KONTRASTMITTELVERSTÄRKTER ULTRASCHALL DER KADAVERNIEREN	21
2.5. STATISTISCHE ANALYSE	22
3. ERGEBNISSE	23
3.1. EIGENSCHAFTEN DER ERLEGTEN TIERE UND DER NIERENORGANE.....	23
3.1.1. <i>Niereneigenschaften nicht ausgewachsener, junger Rehe</i>	26
3.1.2. <i>Einschränkungen der Präparation</i>	26
3.2. ULTRASCHALLBEFUNDE	27
3.2.1. <i>B-Bildsonographie</i>	27
3.2.2. <i>Anomalien oder Pathologien</i>	30
3.2.3. <i>B-bildsonographische Größenmessung</i>	30
3.2.4. <i>B-bildsonographische Befunde der Verletzungen</i>	35
3.2.5. <i>B-Bildsonographie: Luftembolie</i>	35
3.2.6. <i>Farbkodierte Dopplersonographie</i>	38
3.2.7. <i>Kontrastverstärkter Ultraschall</i>	39
3.2.8. <i>Blutungen nach Stichverletzungen</i>	42
3.2.9. <i>Blutungen nach Quetschung und Ruptur</i>	46
3.2.10. <i>Blutungen aus vaskulären Verletzungen</i>	47
3.2.11. <i>Parenchyminfarkte</i>	50
3.2.12. <i>Sono-anatomische Kontrastmittelphänomene</i>	53
3.2.13. <i>Retrograde venöse Nierenperfusion</i>	57
3.2.14. <i>Auswirkung unterschiedlicher Kontrastmitteldosen und -konzentrationen</i>	59
3.2.15. <i>Auswirkung des Kontrastmittelaustritts in das Wasserbad</i>	60
3.3. KOSTEN	62
4. DISKUSSION	64
5. ZUSAMMENFASSUNG	79
6. LITERATURVERZEICHNIS	83
7. VERZEICHNIS DER TABELLEN UND ABBILDUNGEN.....	94
8. GLOSSAR DER JAGDBEGRIFFE	96
9. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	96
10. LEBENSLAUF	98
11. DANKSAGUNG	99

1. Einleitung

1.1. Diagnostischer Stellenwert der Kontrastmittelsono graphie beim Abdominaltrauma

Die fokussierte Ultraschalluntersuchung des Traumapatienten (FAST, focused assessment with sonography for trauma) dient dem Nachweis oder Ausschluss freier Flüssigkeit als Folge einer relevanten Abdominalverletzung [Ali 1996, Healey 1996, Rozycki 1996]. FAST ersetzt seit Ende der 1990er als etablierter Bestandteil der Traumaalgorithmen die zuvor übliche invasive Diagnostik mittels Peritoneallavage [Montoya 2015].

Die Limitationen des FAST durch den alleinigen sonographischen Nachweis freier Flüssigkeit im Vergleich zur kontrastverstärkten Computertomographie sind bekannt: Zwerchfellrupturen, intestinale und mesenteriale Verletzungen, Urinome oder retroperitoneale Verletzungen sowie aktive Gefäßblutungen werden nicht nachgewiesen [Pinto 2014]. Ebenso werden schwerwiegende Verletzungen wie Lazerationen oder Rupturen der Parenchymorgane regelhaft nicht erkannt [Menichini 2015].

Publikationen in der letzten Dekade haben gezeigt, dass diese diagnostische Lücke zwischen B-Bildsonographie und kontrastverstärkter Computertomographie beim Abdominaltrauma durch kontrastverstärkten Ultraschall (CEUS, contrast enhanced ultrasound) geschlossen werden kann. Insbesondere kann durch CEUS die Aussagekraft der Sonographie hinsichtlich einer Parenchymläsion und deren Ausmaß verbessert werden indem Blutungen lokalisiert werden können und nicht nur die freie Flüssigkeit als Blutungsäquivalent dargestellt wird [Cagini 2013, Cokkinos 2013, Clevert 2008, Valentino 2010, Menichini 2015, Miele 2004 und 2015, Catalano 2003, 2004 und 2009, Lv 2011, Sessa 2015, Zhang 2017].

Kontrastverstärkter Ultraschall basiert auf der Vervielfachung der Grenzoberfläche durch im Blut befindlicher gashaltiger Mikrobläschen.

Ultraschallverstärker der zweiten Generation, wie SonoVue® (Bracco Imaging Deutschland GmbH, Konstanz, Deutschland) enthalten Mikrobläschen aus dem inerten Gas Schwefelhexafluorid (SF_6), die durch eine Phospholipidhülle stabilisiert werden [Greis 2004].

Die Mikrobläschen verstärken das Echosignal in den Blutgefäßen und kontrastieren diese im Vergleich zum umgebenden Gewebe, da sie im Gegensatz zu konventionellen Röntgenkontrastmitteln streng intravasal verbleiben.

Die zubereiteten Mikrobläschen haben einen mittleren Durchmesser von $2,5 \mu\text{m}$ - sind somit kleiner als Erythrozyten - passieren die Lungenstrombahn und erreichen die kapillare Endstrombahn [Schneider 1999, Greis 2009].

Durch ihre hohe Stabilität sind langandauernde Untersuchungen bis sechs Minuten möglich [Dietrich 2016].

Die gashaltigen Bläschen vervielfachen die sonographische Grenzfläche und verstärken hierdurch bereits bei niedriger Schallenergie das zurückgeworfene lineare Echosignal. In höheren Schallenergiebereichen beginnen die Mikrobläschen im Schallfeld zu oszillieren und erzeugen so ein charakteristisches, nicht-lineares Echosignal welches den Kontrasteffekt zusätzlich erhöht [Greis 2004, Greis 2009].

Ultraschallgeräte müssen zur Erfassung und Darstellung dieser nichtlinearen Echosignale über geeignete Softwareinstallationen verfügen. Insbesondere muss mit einer niedrigen Energie und einem niedrigen mechanischen Index eingeschallt werden, da bei überhöhten Indices die Bläschen platzen und der Kontrasteffekt verloren geht [Dietrich 2016, Greis 2009].

Die Perfusion der Blutgefäße wird in den Parenchymorganen als Anflutung der peripher venös injizierten Mikrobläschen in das Kapillarbett farblich kodiert dargestellt. In Echtzeit können die Perfusion, die Vaskularisation sowie Transitzeiten und unterschiedliche Kontrastierungsphasen durch die räumliche und zeitliche An- und Abflutung beurteilt und unterschieden werden [Dietrich 2016, Greis 2009].

Blutungen stellen sich als Austritt der Mikrobläschen aus dem Gefäßlumen dar.

In der klinischen Anwendung bieten sich als Vorteile der CEUS gegenüber der kontrastverstärkten Computertomographie die fehlende Röntgenstrahlenanwen-

dung, die im Gegensatz zum Röntgenkontrastmittel jodfrei wie proteinfreie Zubereitung [Greis 2004] und damit deutlich niedrigere Rate an allergischen Reaktionen und insbesondere die fehlende Nephrotoxizität. Vor der Anwendung sind keine Laboruntersuchungen erforderlich.

Anaphylaktische Reaktionen werden in 1:7.000 (0,014%), schwerwiegende Reaktionen in 1:10.000 Fällen gesehen.

14 von 2.447.083 Anwendungen endeten letal, entsprechend 0,0006% aller Fälle; einer um eine Zehnerpotenz niedrigere Rate tödlicher Ausgänge im Vergleich zu den CT-Röntgenkontrastmitteln mit 0,001% [Sidhu 2018].

Die Dokumentation durch Videoaufzeichnung erhält den dynamischen Charakter des Untersuchungsverfahrens. Eine Nachbetrachtung durch Dritte ist später, z.B. in klinischen Konferenzen [Stock 2017] oder in einem telemedizinischen Setting möglich.

Die Videosequenzen eignen sich auch zur realitätsnahen Belebung der Ausbildung.

Durch die Perfusionsdiagnostik ermöglicht die CEUS zusätzlich zum B-bildbasierten Nachweis freier Flüssigkeit durch die FAST Aussagen zu Organverletzungen [Sidhu 2018, Clevert 2008].

Penetrierende Abdominalverletzungen sind jedoch seltene Ereignisse im europäischen Raum [Matthes 2003, Störmann 2016].

Das TraumaRegister DGU® führt für 2018 in Kapitel 8 der „Daten zur Traumaversorgung“ von 32.580 Patienten des Basiskollektivs 3,8% (n=1.197) durch einen penetrierenden Unfallmechanismus Verletzte auf [TraumaRegister DGU® 2019].

In Studien zur bildgebenden Diagnostik von Polytraumatisierten werden penetrierende Verletzungen zwar als Einschlusskriterium definiert aber tatsächlich wie zum Beispiel in der Single-Center CT-Studie von Matthes et al. nicht beobachtet [Matthes 2003].

Gleiches gilt für die Multi-Center-Studie zur Anwendung des CEUS bei Abdominaltraumen von Catalano et al.: neben stumpfen wurden auch penetrierende

Verletzungen als Einschlusskriterium definiert ohne das solche in den 156 Fällen beschrieben werden konnten [Catalano 2009].

Dieses Fehl an penetrierenden Verletzungsmustern ist auf den Ausschluss von kreislaufinstabilen Patienten und damit die Beschränkung auf niedrig-energetische Verletzungsmechanismen zurückzuführen. Weiterhin sind penetrierende thorako-abdominale Verletzungen in der Regel häufiger Folge von Gewaltverbrechen, Kriegshandlungen oder häuslicher Gewalt als zum Beispiel durch Verkehrsunfälle [Güsgen 2017].

Durch diese niedrige Ereignisrate bestehen für den einzelnen Notfallmediziner und Diagnostiker nur Einzelerfahrung zu diesem Verletzungsmuster. Umso weniger findet der kontrastverstärkte Ultraschall als Verbesserung der FAST oder mögliche Alternative zur Computertomographie Beachtung.

1.2. Fragestellung

Stumpfe aber vor allem penetrierende Abdominaltraumen sind ein zu seltenes Ereignis [Matthes 2003, TraumaRegister DGU® 2019] um jedem einzelnen Notfallmediziner eine quantitativ und qualitativ ausreichende sonographische Ausbildung am Patienten zu ermöglichen [Mohammad 2014].

Die methodisch bedingte Schwäche der allein B-bildsonographisch-basierten FAST - die in ihrer Konzeption nur freie Flüssigkeit nachweisen soll - hinsichtlich diagnostischer Aussagen von Parenchymorganverletzungen sind bekannt. Durch die zusätzliche Anwendung kontrastverstärkten Ultraschalls können unmittelbar lebensbedrohliche Organverletzungen erkannt und rascher behandelt oder ausgeschlossen werden als durch die FAST alleine [Sidhu 2018, Clevert 2008].

Daher besteht die Notwendigkeit, ein Simulationsmodell zu entwickeln, in dem stumpfe und penetrierende Parenchymverletzungen mittels Kontrastmittelsonographie dargestellt und nachvollzogen werden können.

Dieses Simulationsmodell sollte durch den Lehrenden einfach und kostengünstig konstruiert werden können und für den Lernenden didaktisch möglichst eindrücklich sein.

Als Simulationsorgan wurde die Niere als geeignet erachtet.

Die Nierenorgane sind häufig bei Abdominalverletzungen beteiligt. Ihre anatomische Struktur ist sonographisch auch durch einen ungeübten Untersucher leicht abzugrenzen und sie liegen den in der FAST diagnostisch darzustellenden intraperitonealen Räumen - dem sog. Morison-Pouch (zwischen rechter Niere und Leber) und sog. Koller-Pouch (zwischen linker Niere und Milz) - unmittelbar an.

Im Gegensatz zur Leber mit ihrer dualen arteriellen und portalen Durchblutung gelingt die Simulation der Nierenperfusion leichter. Durch die im Vergleich zur Leber und Milz kompaktere Organstruktur lässt sich die Niere besser in ein Simulationsmodell einbringen.

2. Material und Methode

2.1. Kadavernieren

2.1.1. Herkunft der Kadavernieren

Die zur Simulation genutzten Nieren wurden waidgerecht geschossenen Rehen und Damhirschen aus der Eigenjagd oder aus einem Damwildgehege des Freiherrn von Ulm-Erbach, Erbach, Baden-Württemberg entnommen. Neben einzeln geschossenen Tieren, konnte anlässlich einer Treibjagd am 10. Dezember 2019 vier Rehen insgesamt acht Nieren entnommen werden.

Üblicherweise wird das erlegte Wild am Abschussort aufgebrochen (ausgenommen) und der sogenannte „Aufbruch“ (Innereien) wird im Jagdrevier belassen.

Für die Studie erfolgte der Aufbruch in einer Wildkammer. Die Nieren wurden mit der umgebenden Fettkapsel möglichst unter Schonung und Erhalt der Nierenarterien entnommen. Durch die Entnahme in der Wildkammer war die unverzügliche Präparation der Nierenorgane möglich.

Die Tiere wurden nach dem Aufbruch (ohne Innereien) in der Decke (d.h. im Fell) mit Haupt gewogen. Die Gewichtsangabe „aufgebrochen mit Haupt“ ist im inter-individuellen Vergleich messgenauer als das Wiegen „unaufgebrochener Tiere“ oder „ohne Haupt“, da sie unabhängig von der letzten Nahrungsaufnahme oder der Höhe der Enthauptung ist [Naegeli 2015].

Weiterhin wurde die Art - Reh (*Capreolus capreolus*) oder Damwild (*Dama dama*) - beide aus der übergeordneten Familie der Hirsche (Cervidae), das Geschlecht, die waidmännische Bezeichnung des Tieres (Bock, Geiß syn. Ricke, Kitz, o.a.) sowie das taxierte Alter und das Abschussdatum notiert.

2.1.2. Ethische Überlegungen

Der Abschuss erfolgte nicht zum Zweck der Studie sondern aus Gründen der Wildhege.

Traditionell erhält der Jäger Herz und Leber des geschossenen Wilds. Die Nieren würden mit den weiteren Innereien (Aufbruch) im Wald belassen werden.

Somit wurden die Nierenorgane keinem anderen Verwendungszweck vorenthalten.

Nach Auskunft des Geschäftsführers der Ethikkommission der Universität Regensburg, Jan von Hassel muss hierzu kein Ethikvotum eingeholt werden.

2.1.3. Mögliche Kontaminationen und Infektionsgefährdung

Eine Infektionsgefährdung der Untersucher oder von Patienten durch Kontamination des verwendeten Ultraschallgerätes kann ausgeschlossen werden.

Gemäß der monatlichen Bulletins durch das Friedrich-Loeffler-Institut, Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit, Greifswald-Insel Riems, bestand in Deutschland von Juli bis Dezember 2019 keine von Wildwiederkäuern auf den Menschen übertragbare Seuchenerkrankung [Friedrich-Loeffler-Institut 2020].

Die Untersuchung wurde ohne direkten Kontakt der Schallkopfoberfläche mit den Kadavernieren durchgeführt.

Die Nieren schwimmen in einem durch einen Plastikbeutel gefasstes Wasserbad. Der Ultraschallkopf wurde nur von außen auf den Beutel aufgesetzt. Dennoch wurde der Schallkopf durch eine Hülle zusätzlich geschützt.

2.1.5. Entsorgung der Kadavernieren

Nach Abschluss des jeweiligen Versuches werden die Kadavernieren als potentiell infektiöser Klinikmüll entsorgt.

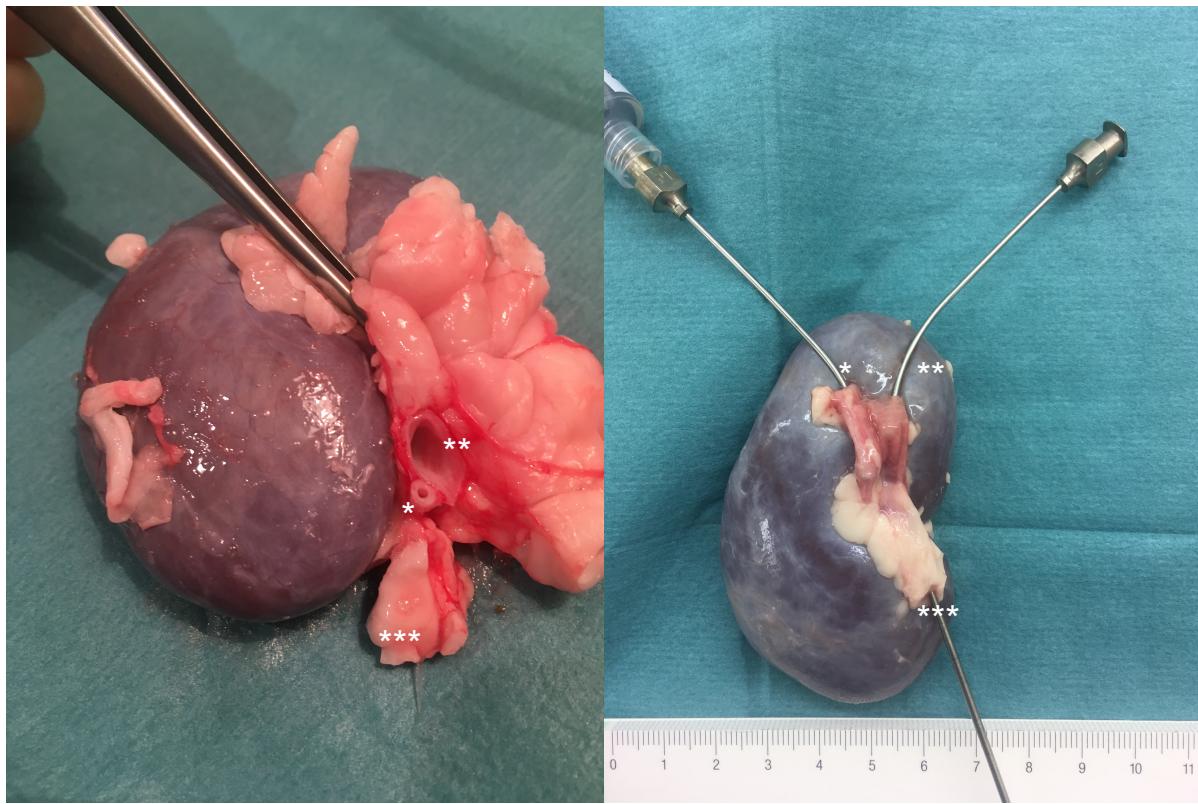
2.1.6. Präparation, Spülung und Transport der Kadavernieren

Der Abschuss wurde telefonisch angekündigt, sodass vor Eintreffen des erlegten Wilds Vorbereitungen zur Präparation getroffen werden konnten.

Der Aufbruch erfolgte in der Wildkammer. Die Nierenorgane wurden mit Gefäßstumpf und in ihrer umgebenden Fettkapsel entnommen. Die Nieren wurden einzeln in einen mit gekühlter 0,9%iger NaCl-Lösung teilgefüllten Gefrierbeutel eingelegt und verwahrt, der durch einen Klipsverschluss geschlossen wurde. Der Transport erfolgt in einer eiswasserbefüllten Kühlbox.

Um eine Organperfusion simulieren zu können, muss thrombosiertes Blut durch Ausspülen entfernt werden.

Zu Beginn der Präparation wird zunächst die Fettkapsel stumpf abgelöst. Hierbei wird im Nierenhilus der Gefäßstumpf geschont und die Arteria renalis und Vena renalis sowie der Harnleiter dargestellt.



A

B

Abb. 1 Präparation der Niere: Blick auf den Nierenhilus (Niere 6.2) nach Entfernung der Fettkapsel mit Darstellung der Arteria renalis (*), der Vena renalis (**) und des Ureters (***) **A** und nach kompletter Entfernung der Fettkapsel inklusive der hilusnahen Anteile. Kanülierung der Arteria renalis (*) und der Vena renalis (**) mit je einer Knopfkanüle von cranial. Sondierung des Ureters von caudal **B**

Die Arteria renalis wird identifiziert und mit einer Knopfkanüle unter stetiger Spülung aus einer aufgesetzten 10 ml Spritze - vorab gefüllt mit gekühlter NaCl 0,9%-Lösung - sondiert. Nach der Sondierung wird die Knopfkanüle durch eine Ligatur im Gefäß fixiert.

Zur Spülung wird eine kühlschrankgekühlte NaCl 0,9%-Infusion (500 ml) mit zugesetzten 5.000 IE oder 25.000 IE unfractionierten Heparins verwendet. Auf eine blasenfreie Entlüftung des Infusionsbestecks ist zu achten.

Die Knopfsonde wird mit dem entlüfteten Infusionssystem konnektiert und die Niere in eine mit gekühlter NaCl 0,9%-Lösung gefüllte Schüssel eingelegt.

Die Spülung erfolgt als Schwerkraftinfusion. Bei korrekter Präparation tritt zu Beginn aus der Nierenvene schlierenartig Blut in das Wasserbad aus. Die Niere wird mit der Gesamtmenge der Infusion von 500 ml gespült.

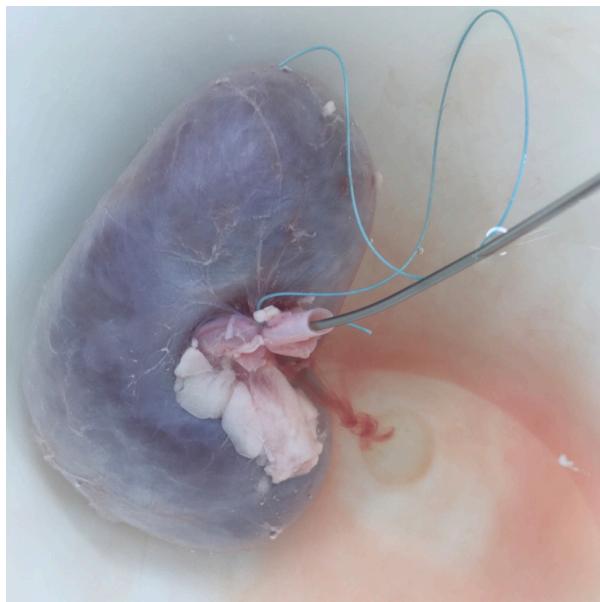


Abb. 2 Spülung der Niere: Durch die mittels Ligatur in der A. renalis fixierten Knopfkanüle wird die Spülung infundiert. Über die V. renalis tritt Blut aus. Die Niere (Nr. 10.1) liegt in einer NaCl-0,9%igen Lösung ein.

Nach der Spülung wird das Infusionssystem von der Knopfkanüle diskonnektiert. Die Knopfkanüle selber wird belassen und die Niere zur Verwahrung wieder einzeln in einen mit NaCl 0,9%iger-Lösung teilgefüllten Gefrierbeutel gegeben. Dieser wird verschlossen und bis zur Sonographie am Folgetag in ein Eiswasserbad gegeben. Der Transport zur Sonographie erfolgt wie oben bereits beschrieben in einer eiswassergefüllten Kühlbox.

Die einzelnen Arbeitsschritte wurden photodokumentiert. Ebenso werden die einzelnen Nieren photographiert.

Bezeichnung	Hersteller	erforderliche Anzahl/Niere	Kosten
Sicherheitsskalpell, Fig. 10	Firma Braun, Melsungen, Deutschland	1	0,55 €
Handschuhe, unsteril, Purple Nitril-Xtra® PF Basics	Firma Halyard	2	0,06 €
OP-Abdecktuch 75 x 90 cm, Foliodrape®	Firma P. Hartmann, Heidenheim, Deutschland	1	0,30 €
Natriumchlorid Infusion 0,9%, Ecobag® 500ml	Firma Braun, Melsungen, Deutschland	1	0,96 €
Heparin Natrium 25.000 IE 5 ml Braun	Firma Braun, Melsungen, Deutschland	1	1,48 €
Heparin Natrium 5000 IE 0,2ml Ratio	Firma ratiopharm, Ulm, Deutschland	1	0,39 €
Infusionsgerät Intrafix Primline®	Firma Braun, Melsungen, Deutschland	1	0,39 €
Surgard2 Safety® G21 0,8 x 38 mm, Kanüle	Firma BD, Franklin Lakes, NJ, USA	1	0,37 €
Instrumentenkanüle 8,25 mm x 7,0, Knopfkanüle, ø 1,2 mm	Firma Meiser, Neustadt, Deutschland	1	1,72 €
BD Posiflush® Spülsystem Fertigspritze 10 ml	Firma BD, Franklin Lakes, NJ, USA	1	2,10 €
Ethilon® monofiler Faden 2-0 1x45 cm	Johnson & Johnson, New Brunswick, NJ, USA	1	1,02 €
Summe			9,34 €

Tbl. 1 Einzelverbrauchsmaterialliste für den Transport und zur Präparation

Es sind nur medizinische Einzelverbrauchsmaterialien aufgelistet.

Nicht aufgelistet und eingepreist werden Gerätschaften wie Kühlschrank, Transportbox, Schüssel, chirurgisches Instrumentarium wie Schere und Pinzette sowie nichtmedizinische, alltägliche Produkte wie Gefrierbeutel, Verschlussklips und Eiswasser.

2.1.7. Vorbereitungen zur Ultraschalluntersuchung

Die Nierenorgane wurden am Folgetag des Abschusses geschallt.

Zur kontrastverstärkten Ultraschalluntersuchung müssen die Nieren, der Ultraschallverstärker und das Wasserbad wie folgt vorbereitet werden:

In einen 500 ml NaCl 0,9%ige Infusionsbeutel wird gemäß der Fachinformation zubereitetes 2,5 bis 5,0 ml SonoVue® (Bracco Imaging Deutschland GmbH, Konstanz, Deutschland) gegeben [Bracco International Fachinformation 2018]. Erst hiernach wird das Infusionssystem an den Infusionsbeutel angeschlossen und luftblasenfrei entlüftet. Damit ist gewährleistet, dass bereits bei Infusionsstart Ultraschallkontrastverstärker infundiert wird. Andernfalls müsste erst ein Volumen von bis zu 20 ml NaCl 0,9%ige-Lösung ohne zugesetzten Ultraschallverstärker aus dem Infusionsbesteck in die Niere infundiert werden. Das so vorbereitete Infusionsbesteck wird luftblasenfrei mit der Knopfkanüle der aus dem Transportbeutel entnommenen Niere konnektiert.

Die Niere wird nun an der Infusionsleitung schwimmend in das Wasserbad gegeben. Hierzu wird ein 5000 ml 0,9%ige NaCl-Lösung fassender „Spülbeutel“ genutzt, der z.B. auch zur Harnblasenspülung oder in der Dialysebehandlung verwand wird. Der hochkant stehende oder hängende Beutel wird an seiner Oberkante durch einen Schnitt auf wenigen Zentimetern eröffnet.

Vor der Einlage der Niere müssen ca. 500 ml der Lösung aus dem Beutel abgeschüttet werden, da es ansonsten während der Untersuchung durch die zugegebene Kontrastverstärkerinfusion oder den Druck des Schallkopfes von außen zum Überlaufen des Beutels käme.

Ein weiterer Beutel wird ebenso vorbereitet um darin nach der Kontrastmittelsono graphie der intakten Niere die Untersuchung nach der Traumasetzung durchzuführen.

Der Beutel wird hochkant mit der darin an der Infusionsleitung schwimmenden Niere in einen Drahtkorb gestellt (Abb. 3).



Abb. 3 Simulationsaufbau zum Ultraschall: Das Wasserbad mit einliegender Niere wird zur Untersuchung in einen Korb neben das Ultraschallgerät gestellt. Die Schwerkraftinfusion des Ultraschallkontrastverstärkers vorbereitet. Ebenso steht ein zweiter Wasserbadbeutel bereit. Die Schallköpfe sind durch eine Hülle geschützt.

Die Sonographie der Niere kann nun mit einem der durch eine Hülle zusätzlich geschützten Schallköpfe, wie bei einem Torso dem Wasserbeutel von außen aufliegend, begonnen werden. Wie üblich muss Kontaktgel verwendet werden.

Bezeichnung	Hersteller	erforderliche Anzahl/Niere	Kosten
Natriumchlorid Infusion 0,9%, Ecobag® 500ml	Firma Braun, Melsungen, Deutschland	1	0,96 €
Infusionsgerät Intrafix Primline®	Firma Braun, Melsungen, Deutschland	1	0,39 €
Surgard2 Safety® G21 0,8 x 38 mm, Kanüle	Firma BD, Franklin Lakes, NJ, USA	1	0,37 €
SonoVue® DFL 5 ml	Firma Bracco, Mailand, Italien	1	74,80 €
NaCl 0,9% Careflex Duo® Beutel 5000 ml	Firma Fresenius, Bad Homburg, Deutschland	2	10,72 €
Schutzhülle US-Sonde, Flexasoft-Convex®	Firma Udo Heisig, Putzbrunn, Deutschland	2	7,60 €
Ultraschall-Kontaktgel 250 ml	Firma P.J. Dahlhausen, Köln, Deutschland	1	1,20 €
Summe			96,04 €

Tbl. 2 Einzelverbrauchsmaterialliste zur kontrastverstärkten Ultraschalluntersuchung

Das Ultraschallsystem ist als Gerätschaft wie der Standkorb und der Infusionsständer nicht eingepreist.

Es sind nur medizinische Einzelverbrauchsmaterialien aufgelistet.

2.2. Ultraschallsystem

Alle Ultraschalluntersuchungen erfolgten mit dem Ultraschallsystem iu22, Fa. Philips, Niederlande unter Nutzung zweier Ultraschallköpfe in den Frequenzbreiten 9-3 MHz-Bereich (Linearschallkopf) sowie 5-1 MHz Bereich (Abdominalschallkopf).

Es wurde die Softwareversion 6.3.7.745 zur kontrastverstärkte Sonographie mit Pulse Inversion (PI) und Power Modulation Pulse Inversion (PMPI) mit einem niedrigen mechanischen Index (MI 0,06) beider Schallköpfe verwendet.

2.3. Kontrastmittelverstärker

Der Ultraschallverstärker SonoVue® (Bracco Imaging Deutschland GmbH, Konstanz, Deutschland) wird gemäß der Fachinformation zubereitet und in einer Gesamtmenge von 2,5 ml oder 5,0 ml der NaCl 0,9%-Infusion (500 ml) zugegeben [Bracco International Fachinformation 2018].

2.4. Kontrastmittelverstärkter Ultraschall der Kadavernieren

Nach den in 2.1.7. beschriebenen „Vorbereitungen zur kontrastverstärkten Ultraschalluntersuchung“ kann die Ultraschalluntersuchung der Nieren im Wasserbad durchgeführt werden.

Zunächst wird eine konventionelle B-Bildsonographie durchgeführt um Organpathologien zu erfassen und eine Größenmessung durchzuführen.

In diesem Untersuchungsabschnitt wird auch die Optimierung des Bildausschnitts, der Eindringtiefe und der Schallverstärkung vorgenommen.

Orientiert an der B-Bilddarstellung wird die Geräteeinstellung zur kontrastverstärkten Sonographie vorgenommen. Zu Beginn der jeweiligen Untersuchung wird die Darstellung in einer sogenannten „split-screen“-Technik gewählt: hierbei wird in der linken Bildhälfte die Untersuchung mit einem niedrigen mechanischen Index (0,06) im Kontrastmittelmodus gezeigt; in der rechten Bildhälfte wird simultan das konventionelle B-Bild projiziert. Der Ultraschallfokus muss an den unteren Bildrand gesetzt werden, um Zerstörungen der Mikrobläschen durch den fokussierten Schall zu verhindern. Die Schallverstärkung wird - orientiert am Bildeindruck des CEUS-Modus - so weit reduziert, dass Ultraschallartefakte unterdrückt werden.

Im zweiten Schritt wird die Schwerkraftinfusion des Kontrastverstärkers SonoVue® zeitgleich mit der Videoaufzeichnung gestartet.

Nun kann unter kontinuierlicher Videodokumentation die Kontrastierung der Nierengefäße, deren Perfusion und das zeitliche und räumliche Einstromverhalten beobachtet werden. Zusätzlich zur Videoaufzeichnung werden Einzelbefunde als Standbild dokumentiert.

Im dritten Abschnitt des Versuchs wird das Trauma gesetzt. Die Kontrastmittelinfusion wird gestoppt. Die Niere wird aus dem Wasserbad gehoben. In der Hand des Untersuchers wird dem Organ eine Stichinzision mit einem Skalpell in einer Polregion, eine Quetschung durch kräftigen Faustschluss zugefügt oder auf der Laborbank liegend ein Keilresektion im Sinne einer Ruptur vorgenommen.

Nachdem die Niere in den vorbereiteten zweiten Wasserbeutel gegeben wurde, wird das Organ zunächst wieder B-bildsonographisch untersucht.

Nach erneuter Bildoptimierung und Einstellung des Kontrastmittelmodus wird die Schwerkraftinfusion des Kontrastverstärkers SonoVue® zeitgleich mit der Videoaufzeichnung gestartet.

Nun können unter kontinuierlicher Videodokumentation mögliche Änderungen der Perfusion durch das gesetzte Trauma, Kontrastmittelaustritt oder Parenchym schäden beobachtet werden. Zusätzlich zur Videoaufzeichnung werden Einzelbefunde als Standbild dokumentiert.

2.5. Statistische Analyse

Die im Simulationsmodell erhobenen Ultraschallbefunde und beobachteten Phänomene werden deskriptiv dargestellt.

3. Ergebnisse

3.1. Eigenschaften der erlegten Tiere und der Nierenorgane

Aus zehn Tieren wurden im Zeitraum vom 19.07.2019 bis 10.12.2019 zwanzig Nieren entnommen.

Davon 16 Nieren aus acht Rehen (*Capreolus capreolus*) und 4 Nieren aus zwei Damhirschen (*Dama dama*).

Keine der Nieren wies einen Schaden durch den Abschuss oder die Entnahme auf, da bei sogenannten „Blattschüssen“ Treffer in den Brustkorb (die sogenannte „Kammer“) erzielt werden und die Nierenorgane abseits davon im Retroperitonealraum liegen (Abb. 4 und 5).

Vom äußereren Aspekt war in keinem Fall eine raumfordernde Pathologie oder eine Anomalie der Organe ersichtlich.

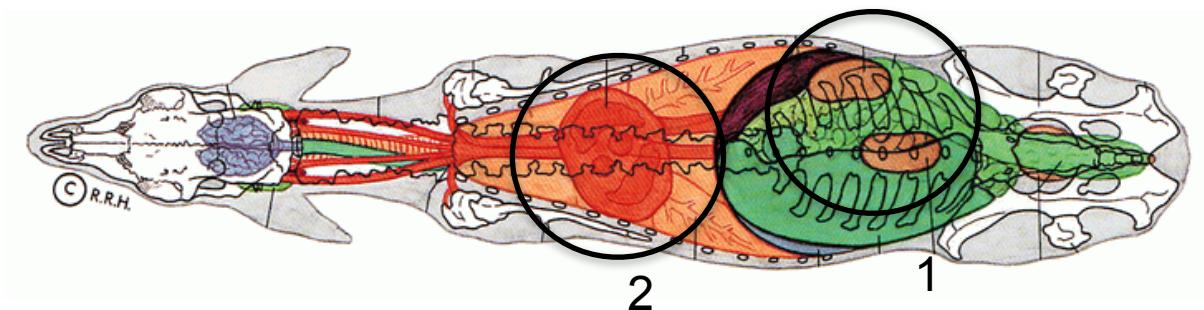


Abb. 4 Anatomie des Rehs in dorsaler Ansicht: Lagebeziehung der Nieren (1) zum Trefferbereich (2) [modifiziert nach Hofmann 2007].

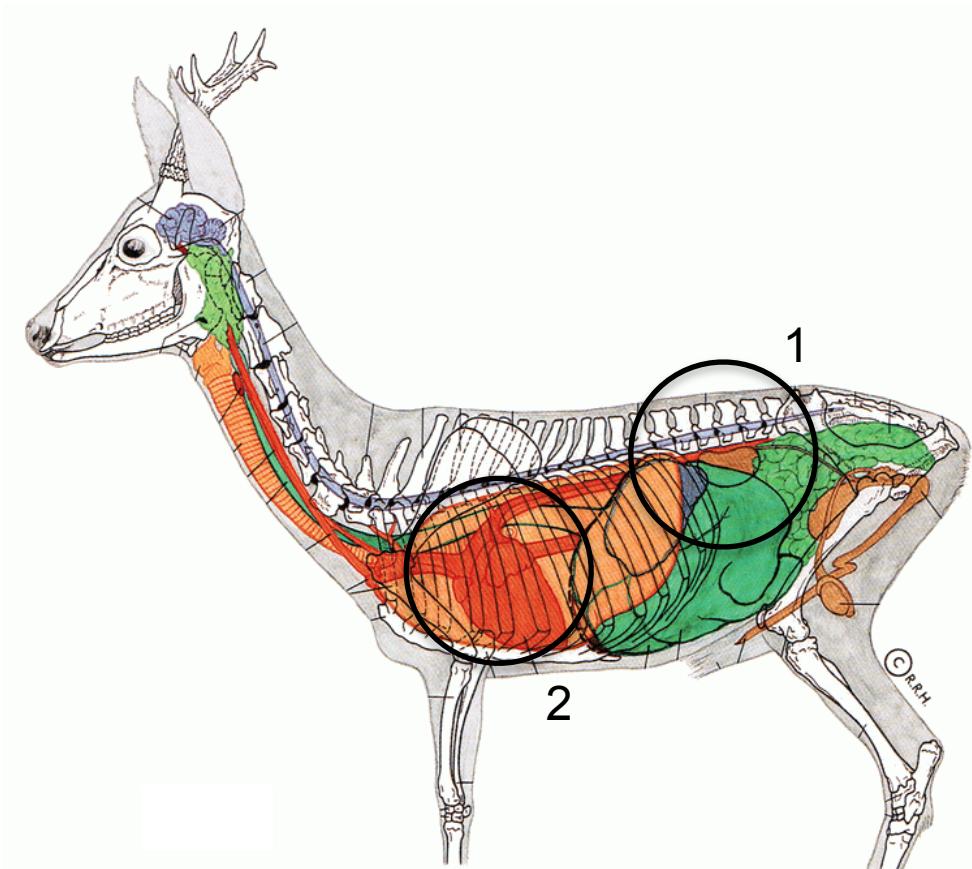


Abb. 5 Anatomie des Rehs in links lateraler Ansicht: Lagebeziehung der Nieren (1) zum Trefferbereich (2) [modifiziert nach Hofmann 2007].

Die Tiere wurden in der zeitlichen Folge ihres Abschussdatums von 1 bis 10 nummeriert. Da die Seitenlokalisation der einzelnen Nieren nicht erfasst wurde, erhielt jedes Organ eine Identifikationsnummer, bestehend aus der Tiernummer und den Ziffern 1 oder 2, abhängig von der Reihenfolge der später durchgeführten sonographischen Untersuchung (Tbl. 3).

Niere Nr.	Tier Nr.	Geschlecht	Alter, Monate	Gewicht kg	Bezeichnung	Abschuss
1.1.	1	w	24	12,2	Geiß	19.07.2019
1.2.						
2.1.	2	w	24	14,2	Geiß	20.07.2019
2.2.						
3.1.	3	w	24	13,8	Geiß	11.08.2019
3.2.						
4.1.	4	m	12	54	Damwild	01.10.2019
4.2.						
5.1.	5	w	6	9	Geißkitz	20.11.2019
5.2.						
6.1.	6	m	6	35	Damwild	06.12.2019
6.2.						
7.1.	7	w	24	13,4	Geiß	10.12.2019
7.2.						
8.1.	8	w	24	18,2	Geiß	10.12.2019
8.2.						
9.1.	9	m	6	10,8	Bockkitz	10.12.2019
9.2.						
10.1.	10	w	24	12,8	Geiß	10.12.2019
10.2.						

Tbl. 3 Basisdaten der erlegten Tiere; erhoben beim Aufbruch

m: männlich, w: weiblich; Alter: bestimmt in Monaten, Gewicht „aufgebrochen mit Haupt“ in Kilogramm; Bezeichnung: siehe Glossar Jagdbegriffe; Abschuss: Datum des Abschuss

Tier Nr. 4 und Tier Nr. 6 sind jeweils der Art Damwild (*Dama dama*) zugehörig (entsprechend Nieren Nr. 4.1, 4.2, 6.1 und 6.2). Diese Art ist im Vergleich zum Reh schwerer.

Deswegen wurden die beiden Damwildtiere aus den Ergebnisbetrachtungen hinsichtlich des Gewichts zur Nierengröße herausgenommen.

Das Gewicht unterscheidet sich nicht nur abhängig von der Art, sondern auch im Geschlecht, Wuchs und Alter der Tiere [Rehnus 2018]. Dies muss bei der weiteren Datenauswertung bedacht werden.

3.1.1. Niereneigenschaften nicht ausgewachsener, junger Rehe

In der Gruppe der Rehe finden sich ein männliches (Bockkitz) und ein weibliches Jungtier (Geißkitz) mit einem taxierten Lebensalter von 6 Monaten, deren Gewicht mit 10,8 kg für das männliche und 9 kg für das weibliche Tier erwartungsgemäß unter den Gewichtserhebungen der ausgewachsenen Rehe liegt.

In einem Alter von > 589 Tagen (1,6 Jahre) gilt Rehwild beiderlei Geschlechts als ausgewachsen [Naegeli 2015].

Bei diesen beiden nicht ausgewachsenen Tieren konnten einzelne Nieren nicht gemäß des Versuchsaufbaus sonographisch untersucht werden.

Im Falle des mit 9 kg leichteren Geißkitz konnte an der Niere Nr. 5.1 keine arterielle sondern nur eine venöse Gefäßsondierung bewerkstelligt werden.

Im Falle des Bockkitzes gelang durch einen Schaden beim Aufbruch am sehr kurzen Gefäßstumpf der Niere 9.2 keine Gefäßpräparation, so dass dieses Organ (9.2) aus der Versuchsreihe genommen wurde.

3.1.2. Einschränkungen der Präparation

Einmal gelang statt der arteriellen Sondierung mit der Knopfkanüle nur die venöse Präparation (Nr. 5.1), sodass später nur eine venöse retrograde Kontrastierung dargestellt werden konnte (siehe 3.1.1).

Zweimal konnte der Nierenarterienstumpf wegen eines Schadens an den Gefäßen bei der Entnahme oder eines zu kurzen Gefäßstumpfes nicht hinreichend präpariert oder sondiert werden. Die venöse Präparation gelang in beiden Fällen ebenso nicht, sodass später keine Kontrastmittelinfektion möglich war und diese Organe aus der sonographischen Studie genommen werden mussten (Nr. 2.2 und 9.2).

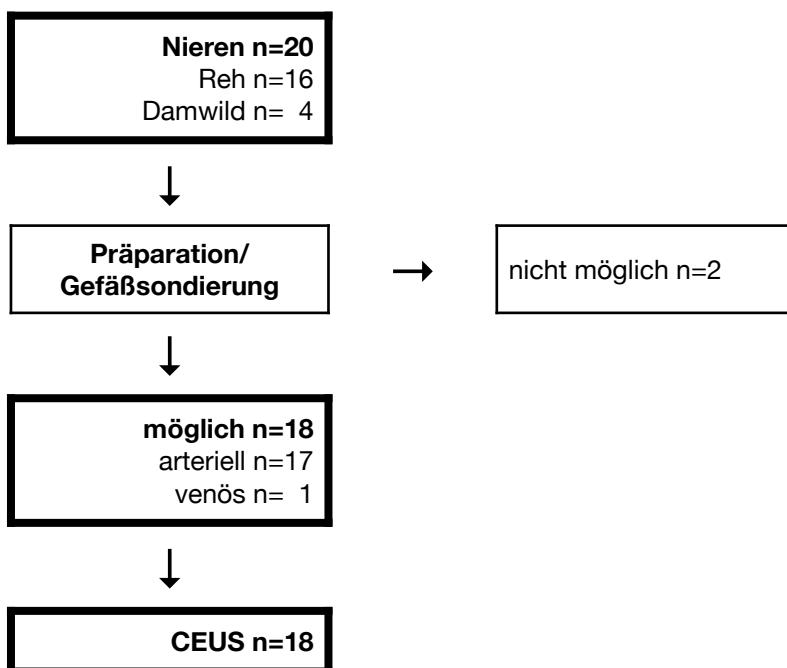


Abb. 6 Anzahl der entnommenen, präparierten und kontrastverstärkt sonographierten Nieren

Somit konnten insgesamt 18 Nieren kontrastverstärkt sonographiert werden (Abb. 6).

3.2. Ultraschallbefunde

3.2.1. B-Bildsonographie

Die Anatomie der Nieren kann sonographisch leicht nachvollzogen werden: äußere Form und Aufbau sind organtypisch. Es findet sich ein bohnenförmiges, längsovales Parenchymorgan mit einer echoreichen, die Glomerula enthaltenen Rinde, die gegenüber den die Tubulussysteme und Sammelrohre enthaltende, echoarmen bis echofreien Nierenpyramiden und dem Nierenbeckenkelchsystem scharf abgegrenzt ist.

Das Parenchym selber ist homogen echoreich (Abb. 7). Die Kapsel zeichnet sich als äußere, linienförmige, echoreiche, scharfe Begrenzung ab.

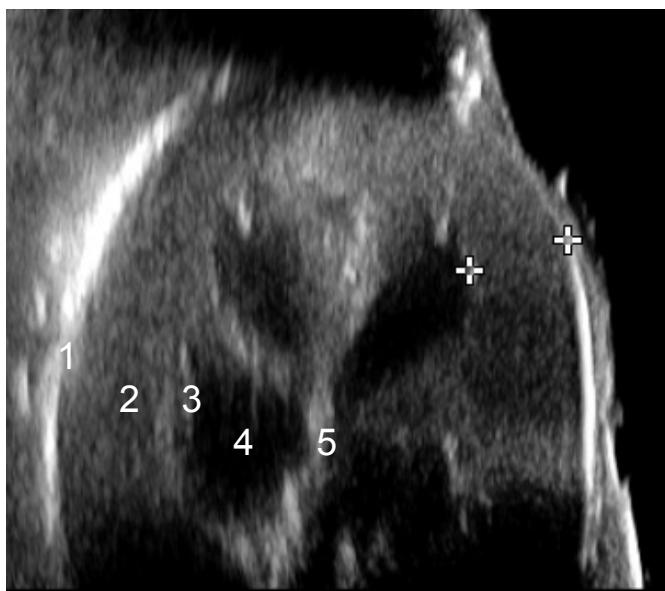
Zapfenförmig ragen isoechogen die columnae renalis (Nierensäulen) aus der Rinde zwischen den Nierenpyramiden in das Nierenmark. Sie enthalten die Segmentgefäß, die sich an der Basis der Nierenpyramiden bogenförmig verzweigen und zwischen der Rinde und dem Nierenmark parallel zur Organoberfläche die vasa arcuata bilden. Diese Gefäßaufzweigung ist B-bildsonographisch nicht darzustellen. Die Grenze zwischen Nierenmark und -rinde zeichnet sich im Aufschnitt der Niere Nr. 5.2 als ein dunkelroter schmaler Streifen ab, der dieser Verzweigungs-ebene der Segmentarterien in die vasa arcuata (Bogengefäß) entspricht. Im weiss-schimmernden Nierenmark lassen sich durch die radiär angeordneten und zartrosa abzeichnenden Vasa recta die Nierenpyramiden abgrenzen. Diese enthalten neben den die Tubulussysteme umfassenden Vasa recta auch Sammelrohre.



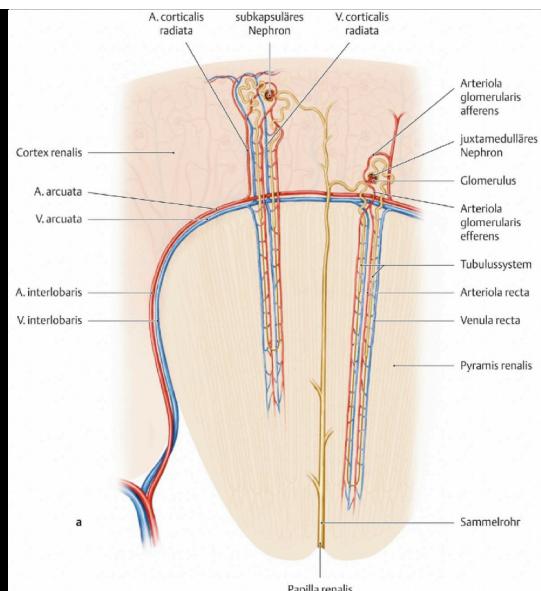
A



B



C



D

Abb. 7 B-Bildsonographie der Nieren: B-Bildsonographie der Nieren Nr. 5.2 **A** und 6.1 **C** im Vergleich zur makroskopischen Anatomie der längs eröffneten Niere Nr. 5.2 **B**

Die echoreiche Nierenrinde ist gegen die echtfreien Strukturen der zentral gelegenen pyramis renalis und des Nierenbeckenkelchsystems scharf abzugrenzen.

Kapsel (1), Nierenrinde (cortex renalis, 2), vasa arcuata (3), Nierenmark mit Nierenpyramiden (pyramis renalis, 4), Nierenbeckenkelchsystem (5) **C** und **D** [aus Schünke 2018].

3.2.2. Anomalien oder Pathologien

Wie bereits im äußereren Aspekt fanden sich auch B-bildsonographisch keine Pathologien oder Anomalien der untersuchten Nieren.

3.2.3. B-bildsonographische Größenmessung

18 Nieren wurden B-bildsonographisch in ihrer Längsachse von Pol zu Pol vermessen (Abb. 8).



Abb. 8 B-bildsonographische Größenmessung: Messung der Nierengröße durch Längsachsenbestimmung in cm. Im Bildbeispiel Niere Nr. 4.1, Damwild, 10 cm messende Längsachse.

Die Messergebnisse sind in der Tbl. 4 zusammengefasst.

Niere Nr.	Nierengröße in cm	Tier Nr.	Geschlecht	Alter, Monate	Gewicht kg	Bezeichnung
1.1.	7,80	1	w	24	12,2	Geiß
1.2.	7,71					
2.1.	7,32	2	w	24	14,2	Geiß
3.1.	7,81	3	w	24	13,8	Geiß
3.2.	7,56					

Niere Nr.	Nierengröße in cm	Tier Nr.	Geschlecht	Alter, Monate	Gewicht kg	Bezeichnung
4.1.	10,0	4	m	12	54	Damwild
4.2.	9,31					
5.1.	6,68	5	w	6	9	Geißkitz
5.2.	6,43					
6.1.	7,46	6	m	6	35	Damwild
6.2.	7,24					
7.1.	7,48	7	w	24	13,4	Geiß
7.2.	7,65					
8.1.	7,45	8	w	24	18,2	Geiß
8.2.	7,10					
9.1.	7,18	9	m	6	10,8	Bockkitz
10.1.	7,09	10	w	24	12,8	Geiß
10.2.	6,58					

Tbl. 4 B-bildsonographische Längsmessung der Nieren in cm

m: männlich, w: weiblich; Alter: bestimmt in Monaten, Gewicht „aufgebrochen mit Haupt“ in Kilogramm; Bezeichnung: siehe Glossar Jagdbegriffe

Die größte Niere maß in Längsausdehnung von Pol zu Pol gemessen 10,0 cm, die kleinste 6,43 cm. Der Mittelwert betrug 7,53 cm, der Median 7,46 cm (Abb.9).

Es erfolgte keine Gesamtbetrachtung aller achtzehn sonographierten Nierenorgane nach Alter, Geschlecht und Gewicht, da die Tiere zu zwei großen unterschiedlichen Arten (Reh (*Capreolus capreolus*) und Damhirsch (*Dama dama*)) gehören, insgesamt nur zwei männliche Tiere erlegt wurden und sich in der Gruppe der Rehe zwei Jungtiere befanden. Eine Niere des zweiten Tieres (Niere Nr. 2.2) war entnahmefähig nicht präparierbar (siehe 3.1.2 Einschränkungen der Präparation).

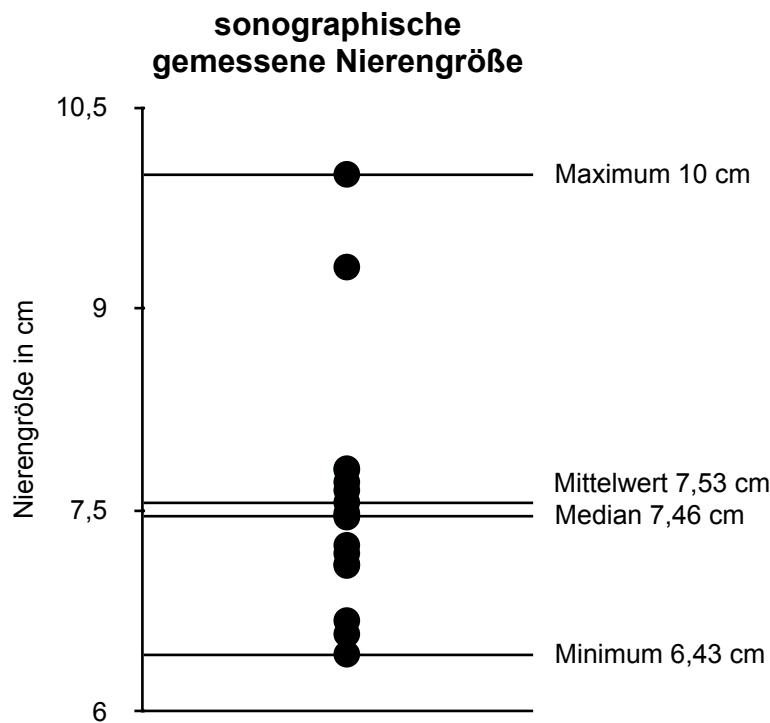


Abb. 9 Verteilung der sonographisch gemessenen Nierengröße aller Tiere, n=18

Nierengröße: B-bildsonographische Längsmessung in cm

Die Nierengröße wurde nur in der homogenen Gruppe der mit 24 Monaten taxierten als ausgewachsen geltenden, sechs weiblichen Rehen (Geissen) im Verhältnis zum Gewicht „aufgebrochen mit Haupt“ ausgewertet.

Somit konnten aus dieser Gruppe von sechs ausgewachsenen weiblichen Rehen 11 Nieren sonographisch vermessen und auch kontrastmittelsono graphisch untersucht werden (Tbl. 5).

Niere Nr.	Tier Nr.	Gewicht kg	Nierengröße in cm
1.1.	1	12,2	7,80
1.2.			7,71
2.1.	2	14,2	7,32
3.1.	3	13,8	7,81
3.2.			7,56
7.1.	7	13,4	7,48
7.2.			7,65

Niere Nr.	Tier Nr.	Gewicht kg	Nierengröße in cm
8.1.	8	18,2	7,45
8.2.			7,10
10.1.	10	12,8	7,09
10.2.			6,58

Tbl. 5 Nierengröße und Gewicht weiblicher, ausgewachsener Rehe, n=11

Gewicht „aufgebrochen mit Haupt“ in Kilogramm,
Nierengröße: B-bildsonographische Längsmessung in cm

Die größte Niere maß in dieser Gruppe in der Längsausdehnung 7,81 cm, die kleinste 6,58 cm. Der Mittelwert betrug 7,42 cm, der Median 7,52 cm (Abb. 10).

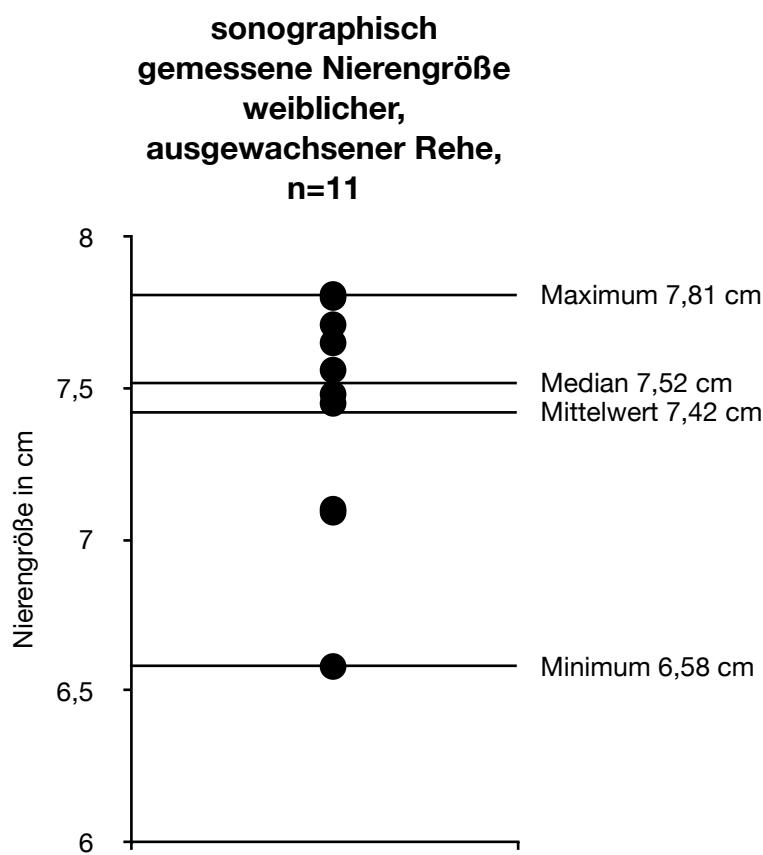


Abb. 10 Verteilung der sonographisch gemessenen Nierengröße weiblicher, ausgewachsener Rehe, n=11

Nierengröße: B-bildsonographische Längsmessung in cm

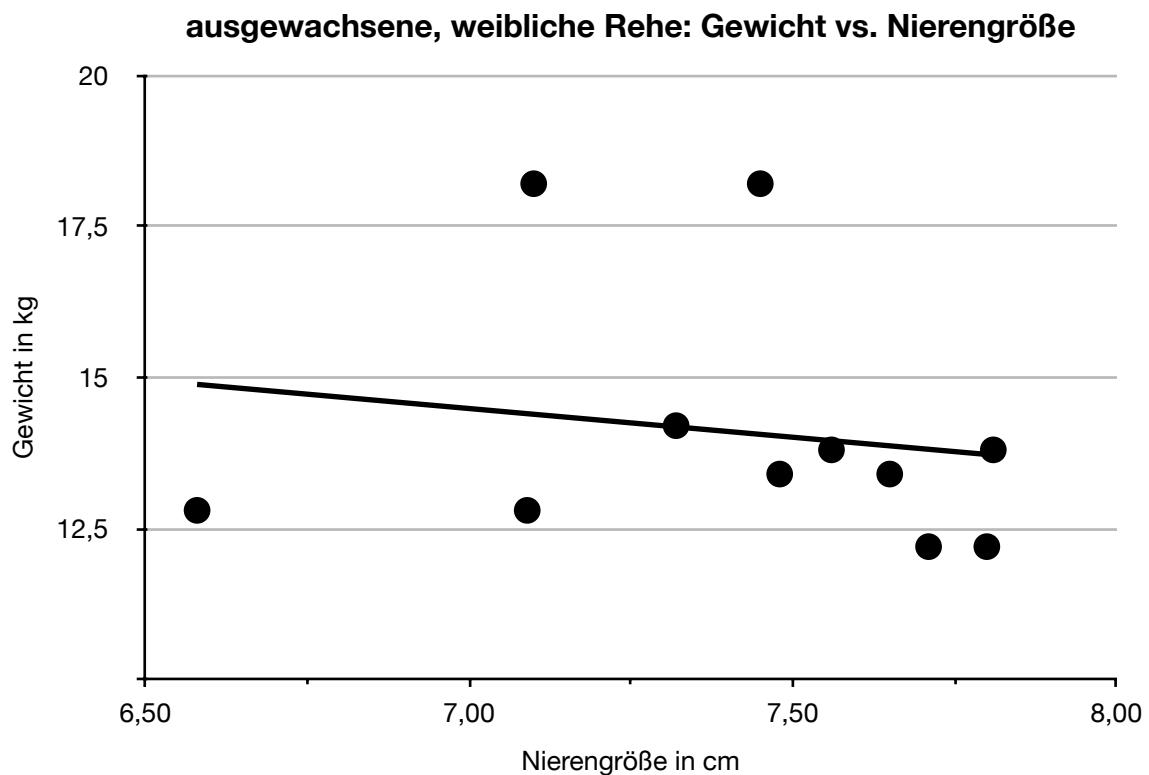


Abb. 11 Nierengröße im Verhältnis zum Gewicht ausgewachsener, weiblicher Rehe, n=11
 Gewicht „aufgebrochen mit Haupt“ in Kilogramm,
 Nierengröße: B-bildsonographische Längsmessung in cm

Es fand sich keine Relation zwischen Gewicht und Nierengröße in der Gruppe der weiblichen, ausgewachsenen Tiere (Abb. 11). Allein die Taxierung als ausgewachsenes Rehtier sprach bereits für eine Versuchseignung der entnommenen Nieren.

Die artbedingt größeren Nieren des Damwildes (Nieren 4.1 mit 4.2 sowie Nieren 6.1 mit 6.2) waren ebenso geeignet wie die der ausgewachsenen Rehe.

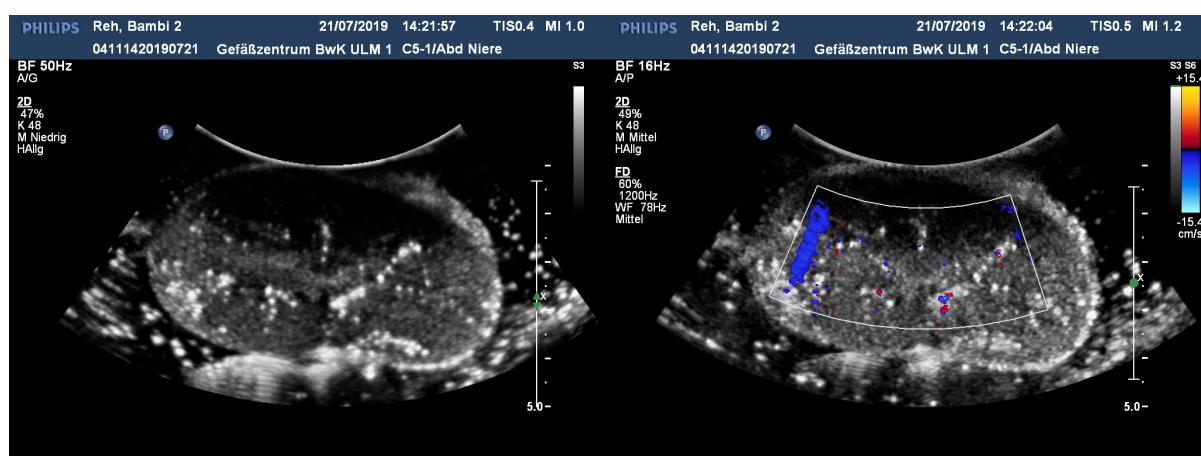
Somit sollten zur Simulation Nierenorgane ausgewachsenen Rehwildes und der größeren Art Damwild verwendet werden.

3.2.4. B-bildsonographische Befunde der Verletzungen

Die Stichverletzungen ließen sich in allen Fällen im B-Bild nicht lokalisieren. Die Quetschungsverletzung ließ sich als echoarmes dreiecksförmiges Areal mit einer Unterbrechung der Kapsel an seiner Basis darstellen (Niere Nr. 9.1). Die Keilexzision einer Polregion zur Simulation einer Ruptur führte zu einem dreiecksförmigen Fehl des Parenchyms und unterbrochener Kapsel (Niere Nr. 10.1).

3.2.5. B-Bildsonographie: Luftembolie

Zu Beginn der Untersuchungsreihe erfolgte während der B-Bildsonographie die Infusion einer reinen NaCl 0,9%iger Lösung ohne Zusatz des Kontrastverstärkers. In der Niere 2.1 ließen sich durch eine nicht blasenfreie Spülösung oder durch die nicht komplett entlüftete Knopfkanüle kleinste Luftbläschen in den zentralen Gefäßen in Form perlschnurartig angeordneter, echoreicher, 1 bis 2 mm durchmessernder, sonomorphologischer Artefakte nachweisen (Abb. 12).



A

B

Abb. 12 B-Bildsonographie: Luftembolie: Niere Nr. 2.1 in der B-Bilddarstellung mit echoreichen, perlschnurartigen Lufteinschlüssen in den zentralen Nierengefäßen sowie Lufftbläschenartefakte im umgebenden Wasserbad **A**; keine zusätzlichen Aspekte durch die farbkodierte Dopplersonographie **B**.

Bei Niere 3.2 kam es nicht durch die Präparation oder durch die Heparinspülung zu einer Luftembolie der Nierenarterien (Abb. 13A), sondern erst durch eine zusätzliche NaCl 0,9%ige zu Beginn der Sonographie. Die B-Bildsonographie nach Infusion der zusätzlichen NaCl 0,9%igen Lösung zeigt die typischen perl schnurartigen, echoreichen Artefakte entlang des anatomischen Gefäßverlaufs (Abb. 13B).



A

B

Abb. 13 B-Bildsonographie: Normalbefund vs. Luftembolie: regelrechter Parenchymbefund der Niere Nr. 3.2 in der B-Bilddarstellung ohne Artefakte **A** und nach Infusion einer Luftbläschen enthaltenden NaCl 0,9%igen Lösung mit echoreichen, perl schnurartigen Artefakten durch Lufteinschlüsse in den Nierengefäßen **B**.

In Abb. 14A lassen sich in Niere 2.1 die bereits in Abb. 13 b-bildsonographisch sichtbaren Luftbläschen analog zu den Mikrobläschen des Kontrastverstärkers auch im Kontrastmittelmodus nachweisen.

In der Abbildung 14B können beispielgebend im Kontrastmittelmodus in den Gefäßen der Niere 3.1 bei alleiniger blasenfreier NaCl-Infusion ohne Kontrastverstärker keine Luftbläschen nachgewiesen werden.



A

B

Abb. 14 Darstellung einer Luftembolie im Kontrastmittelmodus: Sonographie der Niere Nr. 2.1 und Nr. 3.1 ohne Kontrastverstärkerinfusion; jeweils in der split-screen-Darstellung mit Kontrastmittelmodus in der linken Bildhälfte und B-Bildsonographie in der rechten Bildhälfte. In der Niere Nr. 2.1 lassen sich durch die Luftembolie bereits vor der Kontrastverstärkerinfusion Luftbläschen in den Nierengefäßen nachweisen **A**; in der Niere Nr. 3.1 lassen sich als beispielhafter Normabefund keine Lufteinschlüsse nachweisen **B**.

Die intravasalen Luftbläschen beeinflussten die nachfolgende kontrastverstärkte Untersuchung nicht.

In der CEUS ließ sich ein Parenchyminfarkt nachweisen (Abb. 15A). Nach einer Stichinzision zur Traumasetzung konnte diese Verletzung im Sinne der Fragestellung als Kontrastmittelaustritt aus dem Organ dargestellt und lokalisiert werden (Abb. 15B).



A

B

Abb. 15 Kontrastmitteluntersuchungen nach einer Luftembolie: In der ersten Kontrast-mittelsonographie der Niere Nr. 2.1 ist die Rinde des mittleren Nierendrittels nicht durch Mikrobläschen kontrastiert; der Befund entspräche in vivo einem Infarktareal. Die Nierenkapsel zeichnet sich als feine Linie ab **A**. In der zweiten Kontrastmitteluntersuchung treten nach Traumasetzung Mikrobläschen ähnlich einer Rauchfahne aus der Verletzung aus und sammeln sich an der Wasseroberfläche. Der Infarkt stellt sich in dieser Untersuchung wie in Bild A dar **B**.

Dennoch sollte bei der Präparation der Nieren und Zubereitung der Infusionslösungen vermieden werden, Luftblasen in die Organgefäße einzubringen.

Eine Pneumatosis zentraler Organgefäße durch Luftembolien zeigt bereits B-bildsonographisch die beschriebenen typischen sonomorphologischen Artefakte der Luftbläschen. Im Kontrastmodus lassen sich diese Luftbläschen analog zu den Mikrobläschen des Kontrastverstärkers darstellen und somit als Luftembolie beweisen.

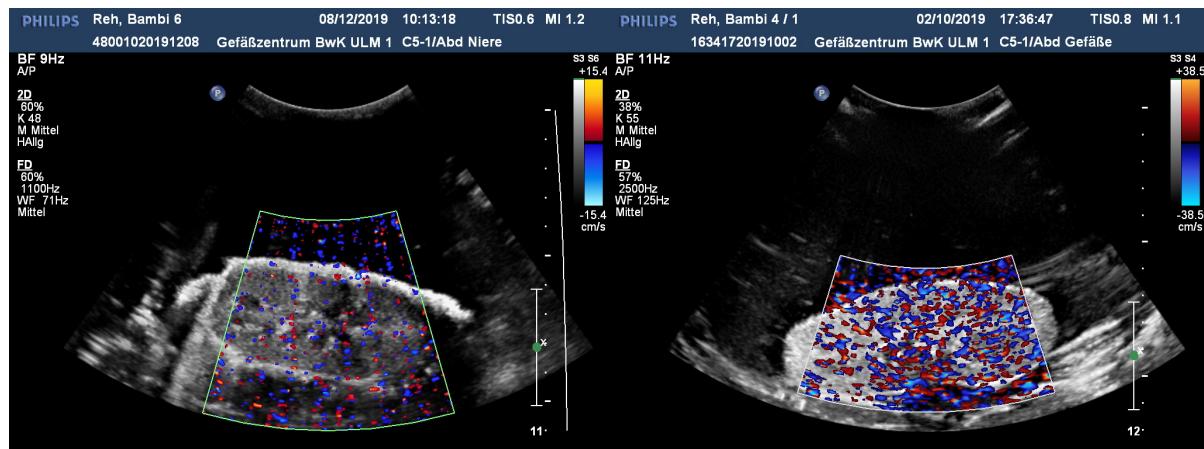
Andere diagnostisch Ultraschallbefunde konnten während der reinen NaCl-Infusion B-bildsonographisch nicht erhoben werden, sodass dieser Untersuchungsabschnitt entfallen konnte.

3.2.6. Farbkodierte Dopplersonographie

Zu Beginn der Untersuchungsreihe erfolgte nach der B-Bildsonographie - abweichend von 2.4 „kontrastmittelverstärkte Ultraschalluntersuchung der

Kadavernieren“ - während der Infusion einer reinen NaCl 0,9%iger Lösung ohne Zusatz des Kontrastverstärkers, eine farbkodierte Dopplersonographie (FKDS).

Unter diesen Bedingungen konnten bei einer Pulsrepetitionsfrequenz (PRF) von 1200 bis 2500 Hz keine diagnostischen FKDS-Signale der Organperfusion abgeleitet werden, da die NaCl-Lösung keine korpuskulären Anteile enthält, durch die im Dopplerverfahren eine Frequenzverschiebung generiert werden könnte. Weiterhin lässt sich durch den gleichförmigen Fluss der kontinuierlichen Schwerkraftinfusion keine Pulswelle simulieren. Die dargestellten FKDS-Signale sind gleichmäßig innerhalb und außerhalb der Niere im Untersuchungsfeld verteilt und entsprechen Bewegungsartefakten, der im Wasserbad schwimmenden Niere (Abb. 16).



A **B**
Abb. 16 farbkodierte Dopplersonographie (FKDS) der Niere Nr. 6.1 mit einer Pulsrepetitionsfrequenz (PRF) von 1100 Hz **A** und der Niere 4.1 mit 2500 Hz **B** während einer NaCl 0,9%igen Infusionslösung. Es kommt kein Flussbild im Sinne eines Perfusionsnachweises zur Darstellung. Die gezeigten FKDS-Signale sind als Artefakte gleichmäßig im Untersuchungsfeld verteilt.

3.2.7. Kontrastverstärkter Ultraschall

Auch wenn das Modell Organblutungen simulieren soll, wurden alle Nieren zunächst ohne ein gesetztes Trauma mit CEUS untersucht. Die hierbei erhobenen Befunde werden ebenso beschrieben wie die Folgen der gesetzten Traumata durch Stichinzisionen, Quetschung und Ruptur.

Der Beginn der Kontrastierung ist durch die kontinuierliche Infusion im Vergleich zur klinischen Anwendung unabhängig von der Kreislaufzeit eines intakten Organismus. Durch das bereits mit der Kontrastmittellösung vorgefüllte Infusionssystem werden die Nierenarterien unmittelbar nach Start der Infusion durchströmt.

Diese frühe „arterielle Phase“ kontrastiert in ihrer anatomischen Abfolge die Segmentarterien, Interlobararterien, Bogenarterien und Aa. radiatae corticales bis an die Kapsel und wird auch als „kortikale Phase“ bezeichnet. Mit Beginn der Kontrastmittelaufnahme in die Markpyramiden folgt auf die „kortikale Phase“ die „medulläre Phase“. Diese beiden Kontrastierungsphasen können im Modell wie *in vivo* beobachtet und nachvollzogen werden.

Die nun folgende klinisch beschriebene Spätphase lässt sich in der Simulation nicht beobachten. *In vivo* nimmt die Kontraststärke ca. 2 Minuten nach der Bolusinjektion ab. Wie der unmittelbare Einstrom zu Beginn der Untersuchung ist dieses Phänomen in der Simulation durch die kontinuierliche Kontrastmittelinfusion bedingt, da permanent neue Mikrobläschen einströmen. Dies ermöglicht eine Simulationsdauer, die deutlich über der klinisch beschriebenen Untersuchungszeit von 4 bis 6 Minuten liegt [Stock 2017, Dietrich 2016].

In Tabelle 6 werden der jeweilige Traumamechanismus und die markanten Sonographiebefunde, die verwendeten Kontrastverstärkerdosen, die jeweilige Heparindosis der Spülösung, die verwendeten Ultraschallsonden sowie Besonderheiten oder Abweichungen im Versuchsablauf zusammengefasst.

Nieren Nr.	B-Bild	CEUS I	Trauma	CEUS II	Kontrast-Dosis ml	Heparin-dosis IE	5-1 MHz-Sonde	9-3 MHz-Sonde	Besonderheiten
1.1.	N	N	Stichinzision	B	2,5	25.000	B-Mode, FKDS, CEUS	B-Mode	tiefgefroren
1.2.	N	N	Stichinzision	B	2,5	25.000	B-Mode, CEUS	CEUS	tiefgefroren
2.1.	Luftembolie	Infarkt	Stichinzision	B	5,0	5.000	B-Mode, FKDS, CEUS	B-Mode, CEUS	
3.1.	N	Infarkt, B	Gefäßperforation	-	5,0	5.000	B-Mode, CEUS	-	
3.2.	Luftembolie	Infarkt	Stichinzision	B	5,0	5.000	B-Mode, FKDS, CEUS	-	
4.1.	N	Infarkt	Stichinzision	B	5,0	5.000	B-Mode, FKDS, CEUS	-	
4.2.	N	Infarkt, B	Gefäßperforation	-	5,0	5.000	B-Mode, CEUS	-	
5.1.	N	retrograde Perfusion	kein Trauma	-	2,5	25.000	B-Mode, FKDS, CEUS	B-Mode	venöse Perfusion
5.2.	N	N	kein Trauma	-	2,5	25.000	-	B-Mode, CEUS	
6.1.	N	Infarkt	kein Trauma	-	2,5	25.000	B, FKDS, CEUS	B-Mode, CEUS	CEUS nach > 36 h
6.2.	N	Infarkt	Stichinzision	B	2,5	25.000	B-Mode, CEUS	-	CEUS nach > 36 h
7.1.	N	N	Stichinzision	B	2,5	25.000	B-Mode, CEUS	-	
7.2.	N	N	Stichinzision	B	2,5	25.000	B-Mode, CEUS	CEUS	
8.1.	N	N	Stichinzision	B	2,5	25.000	B-Mode, CEUS	-	
8.2.	N	N	Stichinzision	B	2,5	25.000	B-Mode, CEUS	-	
9.1.	N	N	Quetschung	B	2,5	25.000	B-Mode, CEUS	-	
10.1.	N	N	Ruptur	B	2,5	25.000	B-Mode, CEUS	B-Mode, CEUS	
10.2.	N	N	Stichinzision	B	2,5	25.000	B-Mode, CEUS	-	

Tbl. 6 Übersicht der Ultraschallbefunde, Traumaart, Kontrastverstärker- und Heparindosis sowie verwendeter Ultraschallsonden und -modi

B-Bild: B-Bildsonographie; **CEUS I:** erste Kontrastmittelsonographie (contrast-enhanced ultrasound) der unverletzten Organe; **CEUS II:** zweite Kontrastmittelsonographie (contrast-enhanced ultrasound) der verletzten Organe; **ml:** Milliliter; **IE:** internationale Einheit; **MHz:** Megahertz

N: Normalbefund; **B:** Blutung; **B-Mode:** B-Bildsonographie; **FKDS:** farbkodierte Dopplersonographie; **CEUS:** contrast-enhanced ultrasound

Als wesentliche Nebenbefunde konnten dosisabhängig vom Heparinzusatz der Spülösung Parenchyminfarkte beobachtet werden. Die Spülösungen der Niere 2.1, des Nierenpaars 3.1 und 3.2 sowie des Nierenpaars 4.1 und 4.2 enthielt nur 5.000 IE unfraktioniertes Heparin.

Im Nierenpaar 6.1 und 6.2 wurden trotz einer Spülung mit 25.000 IE unfraktionierten Heparins ebenso Infarkte beobachtet; dieses Nierenpaar wurde jedoch erst 36 h statt der vorgesehenen 24 h nach Entnahme geschallt.

Elf der achtzehn sonographierten Nieren wurden durch Skalpellstiche verletzt.

Eine Niere wurde in der Hand liegend durch einen kräftigen Faustschluss gequetscht (Niere Nr. 9.1); einer Niere wurde zur Simulation einer Ruptur ein Nierenpol keilförmig reseziert (10.1).

Bei zwei Nieren erfolgte keine zweite CEUS nach einer Traumasetzung, da sich in der ersten Untersuchung bereits ein Kontrastaustritt aus der A. renalis distal der Ligatur zur Fixierung der Knopfkanüle zeigte (Nieren Nr. 3.1 und 4.2).

Die nur venös zu sondierende Niere Nr. 5.1 wurde ohne Trauma retrograd venös kontrastiert.

Das Nierenpaar 1.1 und 1.2 aus dem ersten, am 19.07.2019 erlegten Tier wurde nicht unmittelbar präpariert sondern wurde mit erhaltener Fettkapsel tiefgefroren. Am 01.03.2020 erst wurde es in einem Eiswasserbad aufgetaut und am 02.03.2020 präpariert und sonographiert.

Die mit 6,43 cm kleinste Niere 5.2 wurde nur mit dem Linearschallkopf (9-3 MHz-Bereich) untersucht. An dieser Niere wurden ohne eine zuvor zugefügte Verletzung sono-anatomische Phänomene beobachtet und beschrieben.

Alle anderen 17 Nieren wurden mit der curved array 5-1 MHz-Sonde (Abdomenschallkopf) untersucht. In allen Fällen konnte die simulierte Blutung hiermit nachgewiesen werden.

In sieben dieser 17 Fälle wurde auch die Linear 9-3 MHz-Sonde verwendet. Hiervon wiederum wurde diese 5mal auch im Kontrastmodus angewandt. Dies jedoch nicht um die Blutung nachzuweisen, sondern um hochauflösende Bilder zu generieren.

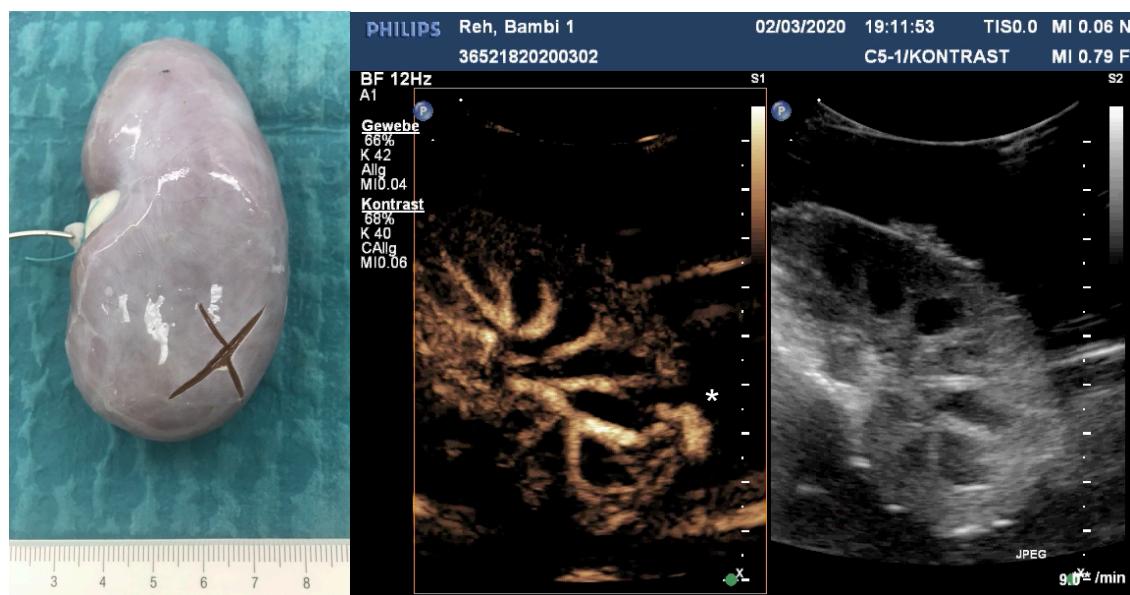
3.2.8. Blutungen nach Stichverletzungen

Elf Nieren wurden durch Skalpellstiche in einer Nierenpolregion verletzt.

In allen Fällen konnte ein fahnenartiger Austritt der Mikrobläschen aus der Verletzung in das umgebende Wasserbad dargestellt werden.

Die Verletzungen ließen sich sowohl in der längs wie quer zur Organachse eingestellten Ultraschallebene lokalisieren.

In Kenntnis der Traumalokalisation lässt sich der initiale Kontrastmittelaustritt aus dem verletzten Organ rasch erfassen. Zumal sich in dieser initialen Untersuchungsphase im umgebenden Wasserbad erst wenige aus der Nierenvene und der Verletzung selber ausgetretenen Mikrobläschen befinden, die den diagnostischen Nachweis überlagern könnten (Abb. 17).



A

B

Abb. 17 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) nach Stichverletzung der Niere Nr. 1.1 mit einem mechanischen Index (MI) von 0,06, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200); Verletzung durch gekreuzte Skalpellstiche **A**.

In der CEUS treten Mikrobläschen fahnenartig (*) aus der Verletzung in das Wasserbad aus. Die Segmentarterien sind kräftiger kontrastiert als die Nierenrinde. Die zwischen den Segmentarterien liegenden Pyramiden sind noch nicht kontrastiert **B**.

Doch auch bei zunehmender Mikrobläschenkonzentration im Wasserbad kann die austretende Kontrastmittelfahne am Ort der Verletzung gesehen werden (Abb. 18).



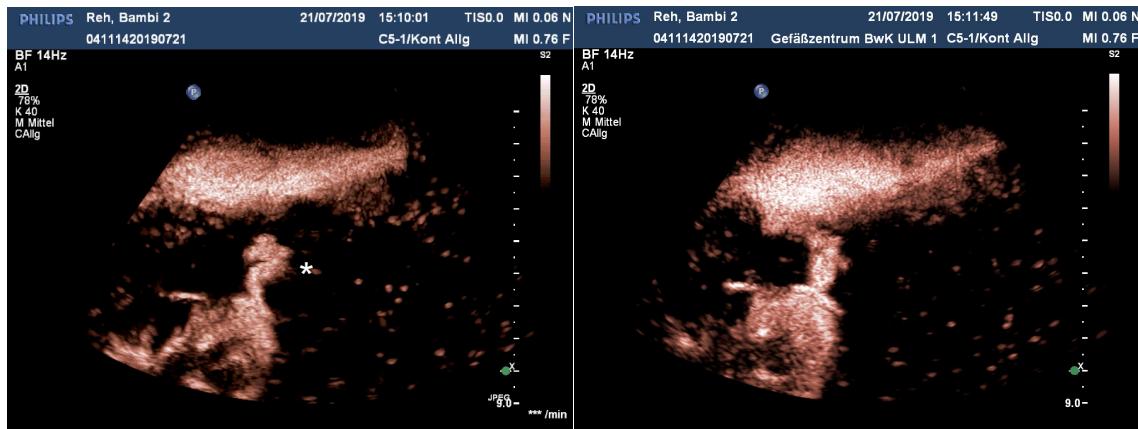
A

B

Abb. 18 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) nach Stichverletzung der Niere Nr. 3.2 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:100) nach Verletzung durch Skalpellstich. In der CEUS treten Mikrobläschen fahnenartig (*) aus der Verletzung in das Wasserbad aus **A**. Auch 37 Sekunden später lässt sich der Kontrastaustritt noch deutlich diskriminieren **B**.

Eine Verletzung in der Konvexität der Niere ließ sich durch Ausrichtung der Schallebene in Organlängsrichtung darstellen (Abb. 19). Durch Verkippen der Schallebene aus der Längsachse nach ventral oder dorsal können solche Blutungen übersehen werden. Dies lässt sich durch eine zusätzliche, kontrollierende Untersuchung in der Querachse verhindern (Abb. 20).

Auf der ventralen oder dorsalen Organfläche gelegene Blutungen ließen sich durch eine quer zur Organachse geführten kontinuierlichen, schwenkartigen Bewegung des Schallkopfs und somit der Schallebene erfassen.



A

B

Abb. 19 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) nach Stichverletzung in Längsachse der Niere Nr. 2.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:100) nach Verletzung durch Skalpellstich. Das in Längsachse eingestellte Organ reicht über den linken unteren Bildrand hinaus. In der CEUS treten Mikrobläschen fahnenaartig (*) aus der Verletzung in das Wasserbad aus **A**. Die Kontrastmittelfahne steigt auf. Die Mikrobläschen sammeln sich an der Wasseroberfläche **B**. Beachte den Zeitunterschied von 1:48 min. zwischen **A** und **B**.



A

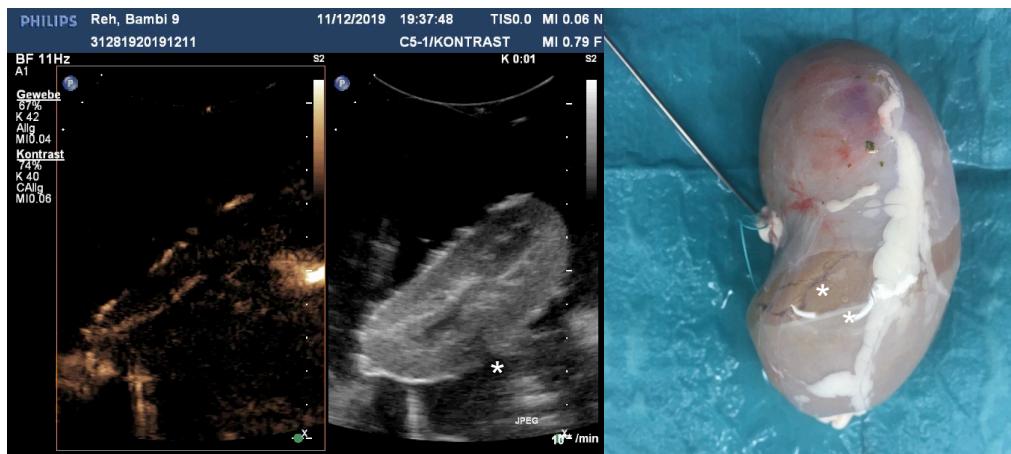
B

Abb. 20 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) nach Stichverletzung in Längs- und Querachse der Nieren Nr. 1.1 und Nr. 1.2 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200) nach Verletzung durch Skalpellstich.

Aus dem in Längsachse eingestellten Organ (Nr. 1.1) treten Mikrobläschen fahnenaartig (*) aus der Verletzung in das Wasserbad aus und steigen entlang der konvexen Aussenfläche nach oben **A**. In der queren Achseinstellung der Niere Nr. 1.2 wird auch die außerhalb der Längsachse liegende Blutung erfasst **B**.

3.2.9. Blutungen nach Quetschung und Ruptur

Niere Nr. 9.1 wurde in der Hand liegend durch einen kräftigen Faustschluss gequetscht.



A

B

Abb. 21 Quetschverletzung der in der Hand liegenden Niere 9.1 durch Faustschluss.

Das in Längsachse eingestellte Organ weist in der B-Bildsonographie einen echoarmen, dreieckigen, lefzenförmigen Einriß in die Nierenrinde mit Unterbrechung der Kapsel (*) auf **A**. Makroskopische Dokumentation des Kapseleinriß (*) **B**.



Abb. 22 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) nach Quetschung der Niere Nr. 9.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200).

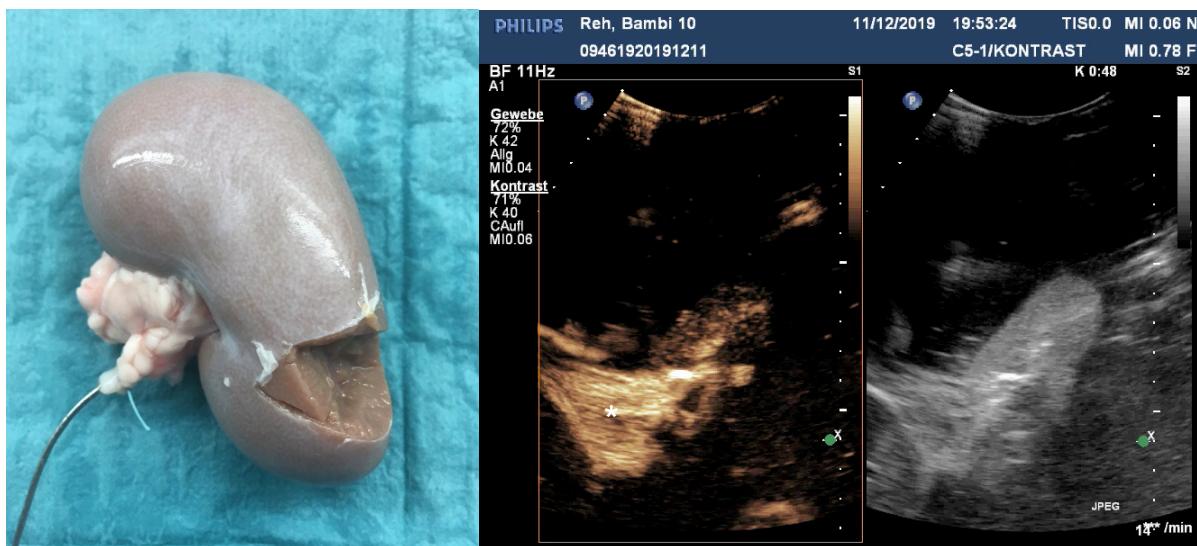
Bei quer zur Organachse eingestellter Schallebene treten Mikrobläschen fahnenartig (*) aus der Verletzung in das Wasserbad aus.

In der nachfolgenden CEUS zeigt sich ein fahnenartiger Austritt der Ultraschallkontrastbläschen in die umgebende Flüssigkeit (Abb. 22).

Dieser Befund stellt sich gleichförmig wie das Kontrastmittelmuster der Stichverletzungen dar. Das Kontrastmittel tritt durch einen Kapsleinriß aus.

Der Befund der Kontrastuntersuchung der Keilresektion einer Polregion an Niere Nr. 10.1 stellt sich anders dar.

Der Ausstrom der Mikrobläschen erfolgt im Gegensatz zu einem Stich nicht durch eine punktuelle Verletzung, sondern aus einer Wundfläche. Das austretende Kontrastmittel gleicht einem breiten Strom und nicht einer Fahne mit einem punktuellen Austritt als Ursprung.



A B

Abb. 23 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) nach Keilresektion der Niere Nr. 10.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200) zur Simulation einer Organruptur. Aus der Wundfläche **A** treten Mikrobläschen in einem breiten Strom (*) aus der Verletzung in das Wasserbad aus **B**.

3.2.10. Blutungen aus vaskulären Verletzungen

Bei zwei Nieren erfolgte keine Traumasetzung, da sich in der ersten CEUS-Untersuchung bereits ein Kontrastaustritt aus der A. renalis hinter der Ligatur zur Fixierung der Knopfkanüle zeigte (Nieren Nr. 3.1 und 4.2).

Am kontrastierten arteriellen Gefäßstumpf der Nieren treten Mikrobläschen jetartig durch eine Verletzung der kanülierten A. renalis aus. Das Nierenparenchym kontrastiert sich kaum, da der größte Anteil des Kontrastmittelvolumens dem geringeren Widerstand folgend, bereits durch die Perforation des zuführenden Gefäßes ausströmt. Bestand die Perforation bereits während der Heparinspülung, ist diese nicht ausreichend gewesen und in beiden Nieren kommt es zusätzlich zum Bild von Infarkten.

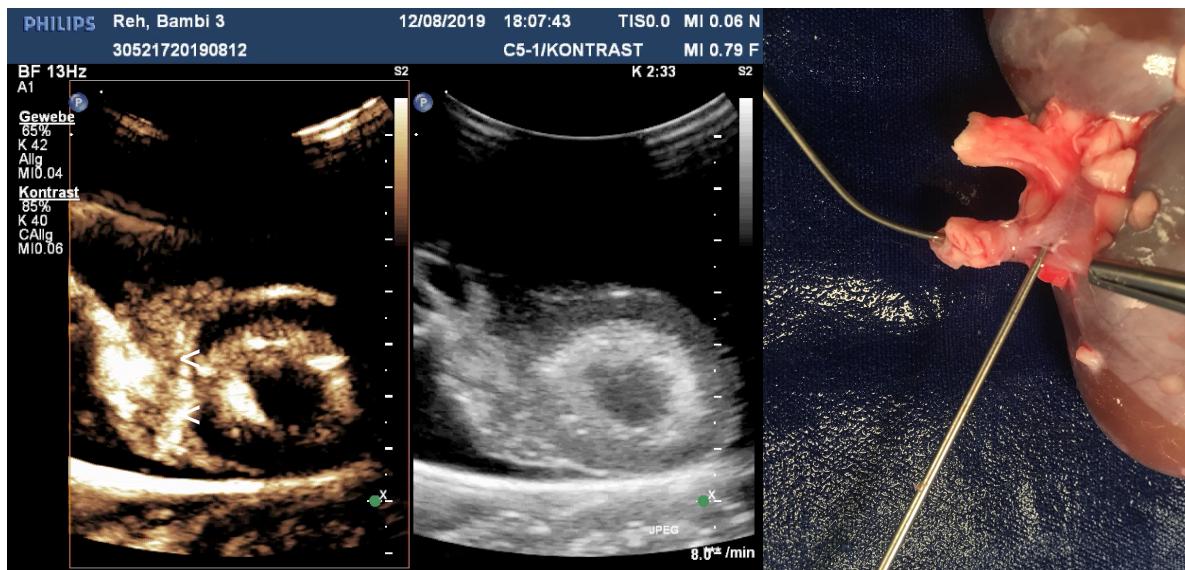
Die Lokalisation der Gefäßverletzung gelingt in der queren Schallebene zur Organachse.

Makroskopisch können die CEUS-Befunde nach der Untersuchung bestätigt werden.



A

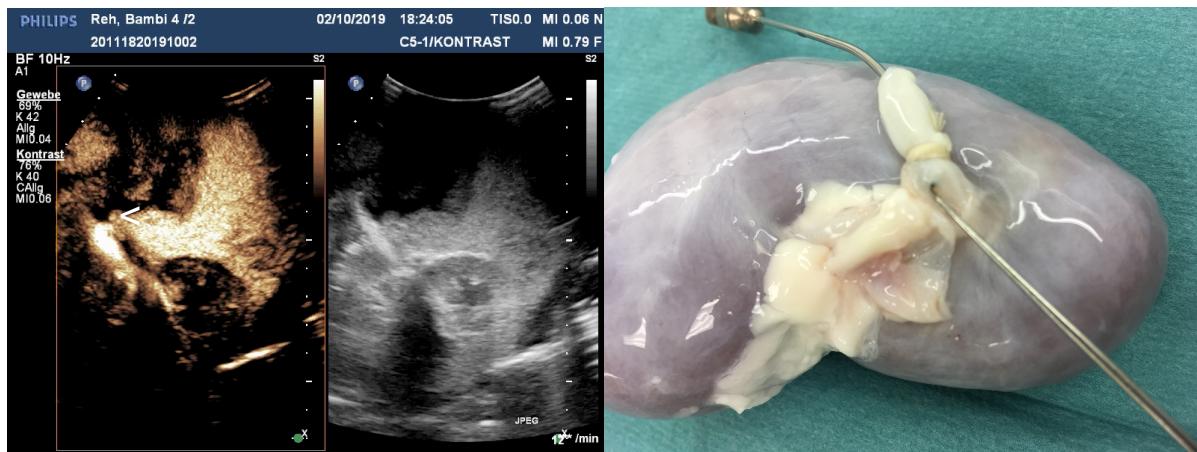
B



C

D

Abb. 24 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) bei Gefäßverletzung der A. renalis der Niere Nr. 3.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:100). Am kontrastierten arteriellen Gefäßstumpf treten Mikrobläschen nach ventral und dorsal (Pfeil) in gleicher zeitlicher Dynamik zur Infusionsgeschwindigkeit aus. Die fehlende Kontrastierung der Nierenrinde spricht für deren Infarkt. Bildfolge A-C im Sekunden-takt. Der makroskopische Befund bestätigt die CEUS. Einliegende Sonde in der Perforation D.



A

B

Abb. 25 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) bei Gefäßverletzung der A. renalis der Niere Nr. 4.2 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:100). Am kontrastierten arteriellen Gefäßstumpf treten Mikrobläschen nach ventral in gleicher Dynamik wie der arterielle Einstrom aus (Pfeil) **A**. Der makroskopische Befund bestätigt die CEUS. Einliegende Sonde in der Perforation **B**.

3.2.11. Parenchyminfarkte

In der CEUS der unverletzten Nieren 2.1, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 6.1, 6.2 demaskierten sich in der Nierenrinde Areale ohne Kontrastierung. Dieser Befund entspräche in vivo einem Infarkt. In vitro der hier geführten Simulation muss als Ursache der fehlenden Kontrastierung eine Gefäßthrombosierung durch eine unzureichende Spülung mit zu geringer Heparindosis angenommen werden.



Abb. 26 Infarktnachweis durch kontrastverstärkten Ultraschall (CEUS) der unverletzten Niere Nr. 2.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:100). Die Rinde des mittleren Nierendrittels ist nicht durch Mikrobläschen kontrastiert; der Befund entspräche in vivo einem Infarktareal. Die Nierenkapsel zeichnet sich als feine Linie ab.



Abb. 27 Infarktnachweis durch kontrastverstärkten Ultraschall (CEUS) der unverletzten Niere Nr. 3.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:100). Kontrastmittelbläschen gelangen nur bis in die Segment- und Interlobärarterien **A**. Im Querschnitt entsteht ein kranzförmiges Kontrastbild mit scharfer inneren Grenze zum Nierenbeckenkelchsystem und unscharfer, ausgefranster äußerer Grenze zur Nierenrinde. Der Bildeindruck wird durch das außerhalb des Organs im Wasserbad befindliche Kontrastmittel verstärkt **B**.



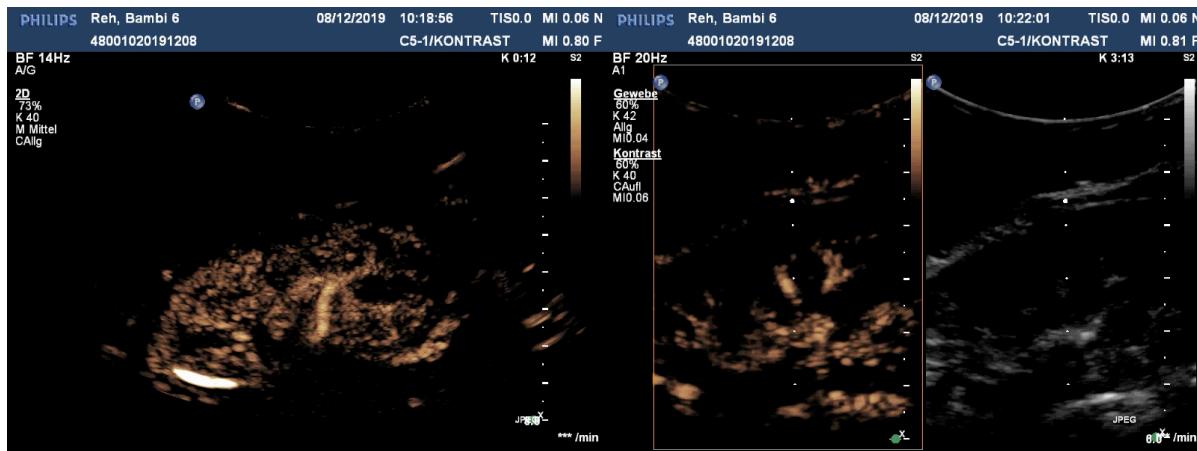
A

B

Abb. 28 Infarktnachweis durch kontrastverstärkten Ultraschall (CEUS) der unverletzten Niere Nr. 4.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:100). Im Längsschnitt gelangen Kontrastmittelbläschen nur bis in die Segment- und Interlobärarterien. Die Nierenrinde ist nicht kontrastiert. Die in das CEUS- und das B-Bild projizierte Biopsieführung erleichtert den Bildvergleich der Ultraschallmodalitäten **A**. Im Querschnitt ist die Kontrastierung zur Nierenrinde unscharfe begrenzt; in der Nierenrinde selber lassen sich keine Mikrobläschen nachweisen **B**.

Die Nieren 2.1, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2 wurden im Gegensatz zu allen anderen Organen nur mit einer Heparindosis von 5.000 IE als Zusatz zur NaCl 0,9%-Lösung gespült.

Nachdem alle nachfolgend untersuchten Nieren daraufhin mit zugesetzten 25.000 IE Heparin gespült wurden, konnten nur noch in den Nieren 6.1 und 6.2 Infarkte nachgewiesen werden. Dieses Nierenpaar wurde ebenso mit der erhöhten Heparindosis von 25.000 IE gespült, die Ultraschalluntersuchung fand jedoch nicht innerhalb von 24 Stunden, sondern erst 36 Stunden nach dem Abschuss statt.



A

B

Abb. 29 Infarktnachweis durch kontrastverstärkten Ultraschall (CEUS) der unverletzten Niere Nr. 6.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200). Im Längsschnitt ist die links im Bild abgebildeten Organhälfte bis subkortikal kontrastiert; der rechts gelegene Nierenpol ist nicht gleichförmig kontrastiert **A**. Auch nach einer Untersuchungsdauer von 3 Minuten sind in diesem Rindenareal keine Kontrastbläschen nachzuweisen **B**. Die in das CEUS- und das B-Bild projizierte Biopsieführung erleichtert den Bildvergleich der Ultraschallmodalitäten.

3.2.12. Sono-anatomische Kontrastmittelphänomene

Obwohl die Niere 5.2 mit 6,43 cm das kleinste untersuchte Organ war, konnte die Nierenarterie mit der Knopfkanüle (1,2 mm Durchmesser) sondiert und das Organ arteriell kontrastmittelsono graphiert werden.

Die Heparindosis in der Spül lösung betrug 25.000 IE Heparin. Zur Kontrastmittelsono graphie wurden 2,5 ml SonoVue® in 500 ml NaCl 0,9%-Infusionslösung gegeben.

Die Ultraschalluntersuchung erfolgte mit dem Linearschallkopf (9-3 MHz-Bereich).

Durch die Nutzung des Frequenzbereichs 9-3 MHz ist eine höhere Ortsauflösung als durch die üblicherweise zur Untersuchung der Abdominalorgane verwandte 5-1 MHz-Frequenz-Sonde möglich.

Die Anatomie der Vaskularisation und deren Perfusion kann mit dem Einstrom der Mikrobläschen in die hilusnahen Segmentarterien, über die Interlobärarterien bis in die zwischen dem Nierenmark und der Nierenrinde liegende Aa. arcuatae verfolgt werden.

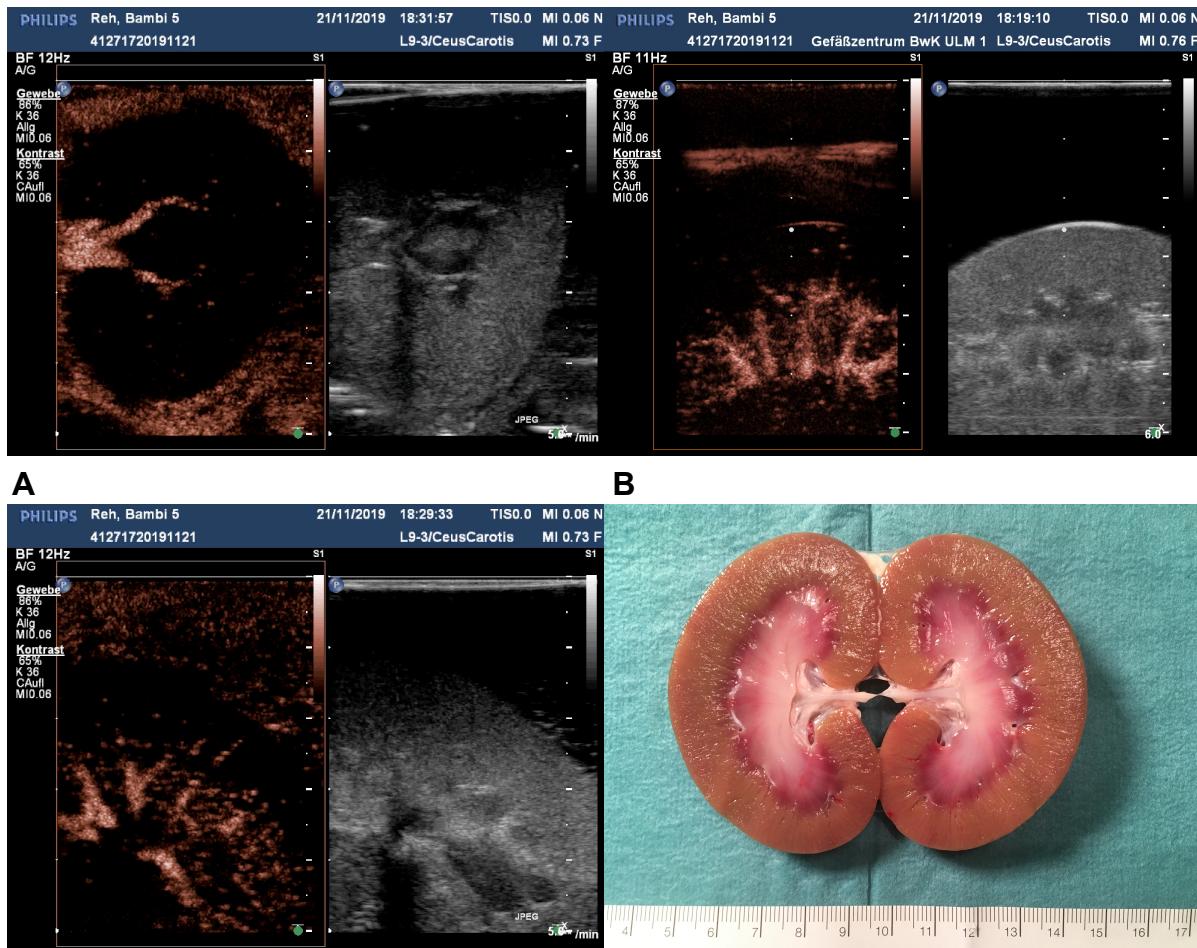


Abb. 30 Sono-Anatomie durch kontrastverstärkten Ultraschall (CEUS) der Niere Nr. 5.2 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, 9-3 MHz-Sonde, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200). Standbild im Querschnitt des einströmenden Kontrastmittels aus der A. renalis in die Segmentarterien um das Nierenbeckenkelchsystem: Das Nierenmark und die Nierenrinde sind noch nicht kontrastiert **A. Standbild im Längsschnitt: Perfusion der Segmentarterien und der Aa. interlobares im Mark sowie der Aa. arcuatae in der Mark-Rinden-Grenze. Einzelne Mikrobläschen sind bereits in den Aa. corticales radiatae der Nierenrinde zu sehen **B-C**. Die in das CEUS- und das B-Bild projizierte Biopsieführung erleichtert den Bildvergleich der Ultraschallmodalitäten **B**. Der makroskopische Längsaufschlitt dient zur anatomischen Orientierung **D**.**

Von dort strahlen die Kortikalgefäße (A. corticalis radiata) radiär angeordnet in die Nierenrinde bis subkapsulär aus. Die Mikrobläschen lassen sich einzeln auf ihrem

Weg zu den subkapsulär gelegenen Glomerula verfolgen. Die Darstellung gleicht perlchnurartig aufsteigenden Luftperlen im Champagnerglas.

Subkapsulär beginnend vollführen die Mikrobläschen dann zunächst eine schlängelnde Seitwärtsbewegung, gefolgt von einer geradlinigen Abwärtsbewegung, die anatomisch der Perfusion der Glomerula und dem venösen Rückstroms über die Vv. corticalis radiatae in die Vv. arcuatae entspricht.



A

B

Abb. 31 Sono-Anatomie durch kontrastverstärkten Ultraschall (CEUS) der Niere Nr. 5.2 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, 9-3 MHz-Sonde, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200). Standbild der Rindenperfusion der unmittelbar der Wasserbeutelwand anliegenden Niere. Auch im Standbild kann der zur Kapsel gerichtete Fluß der perlkettenartig in den Aa. corticales radiatae angeordneten Kontrastbläschen nachvollzogen werden A-B.

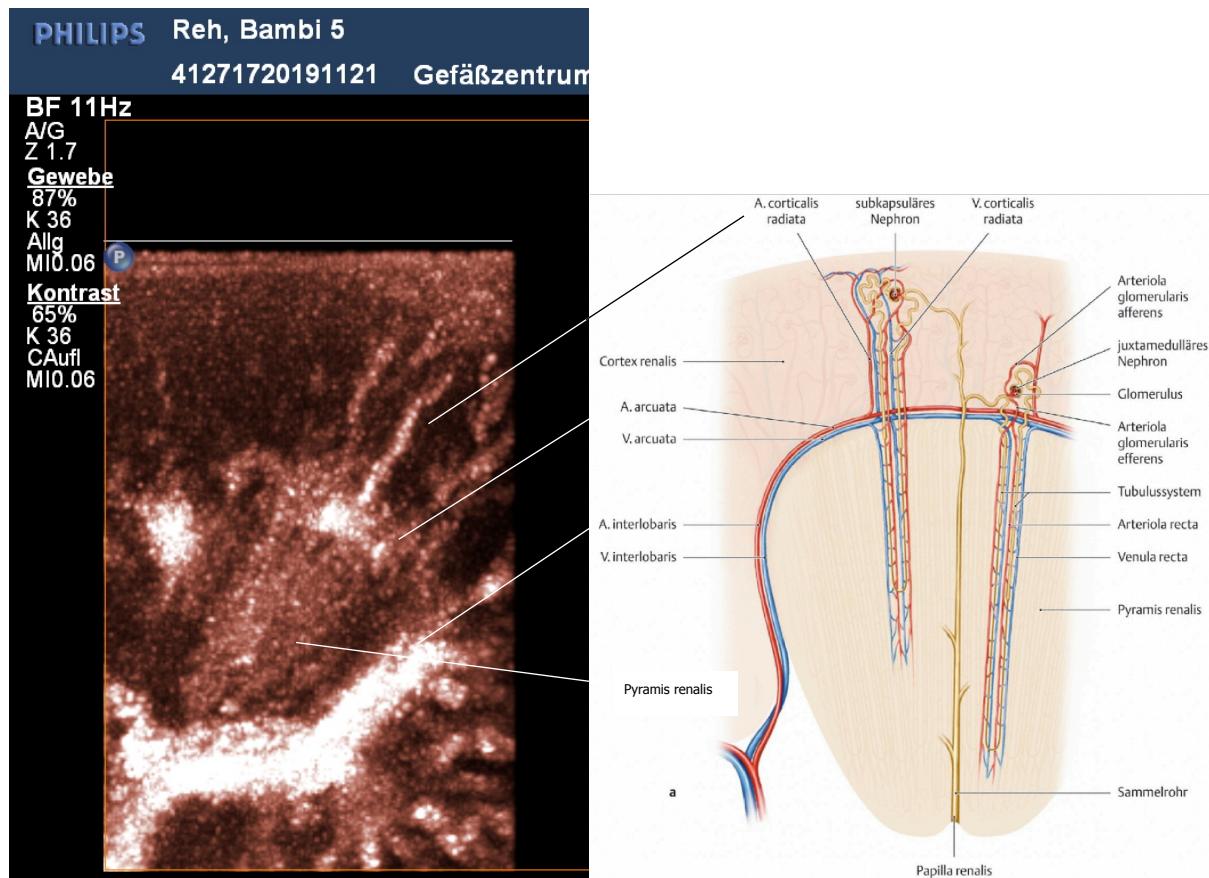
Die Anatomie der Vaskularisation kann in einem Summationsbild der einzelnen Bläschenbewegungen visualisiert werden.

Im MVI (microvascular imaging®)-Modus werden mit Hilfe der Q-Lab-Software® (Philips Medical Systems) die maximal kontrastierten Bildpunkte aus den Einzelbildern der Videoaufzeichnung summiert, sodass der Weg einzelner Kontrastmittelbläschen die Anatomie nachzeichnet.

Durch die gleichzeitige Signalunterdrückung der geringer kontrastierten Umgebung wird dieser Bildeindruck noch verstärkt.

In dieser Bildsummation wird vor allem auch die geringere Vaskularisation (Vasa recta) und damit auch die geringere Perfusion in den Markpyramiden entlang des Tubulussystems und der Sammelrohre deutlich. Die im B-Bild echoarmen bis echofreien und in der farbkodierten Dopplersonographie scheinbar nicht

perfundierte Pyramiden offenbaren im MVI-Modus ihre tatsächliche Durchblutungssituation.



A

B

Abb. 32 Sono-Anatomie durch kontrastverstärkten Ultraschall (CEUS) der Niere Nr. 5.2 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, 9-3 MHz-Sonde, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200). Summationsbild im MVI (Microvascular Imaging®)-Modus: die Bewegung einzelner Mikrobläschen werden als maximal kontrastierte Bildpunkte dargestellt. So entsteht in der Nierenrinde der Bildeindruck komplett durchgezeichneter bzw. kontrastierter Gefäße; in der Nierenrinde wie dargestellt den Aa. corticales radiatae entsprechend **A. Das Sonographiebild ist vergleichend einem Anatomiebild gegenübergestellt [aus Schünke 2018] **B**.**

Auf eine Untersuchung nach Verletzung der Niere wurde verzichtet.

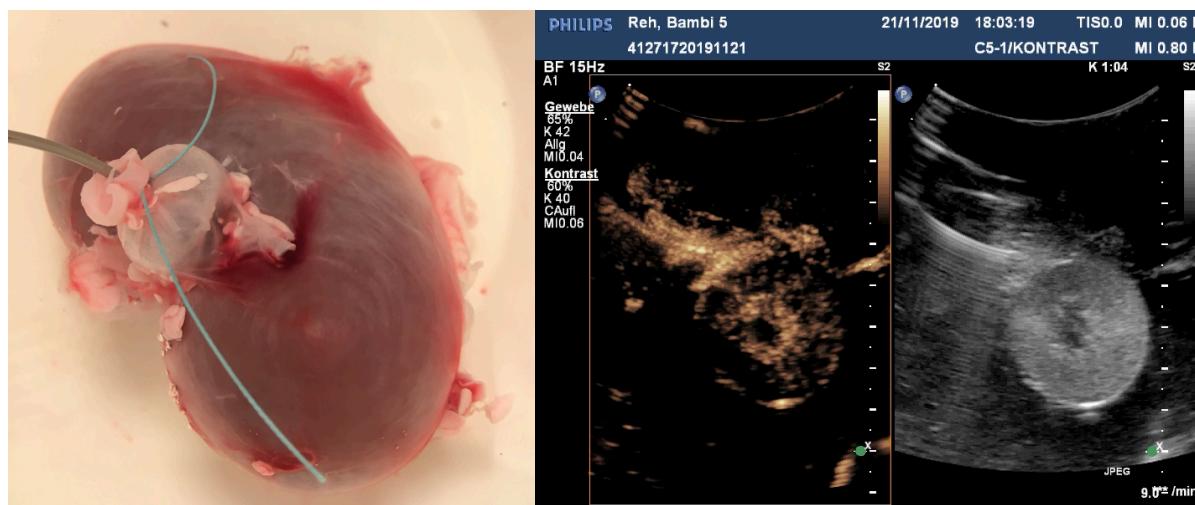
Durch die hohe Auflösungsmöglichkeit der gewählten Ultraschallfrequenz konnte in vitro die Perfusion unterschiedlicher anatomischer Funktionseinheiten, wie der Nierenrinde und der Markpyramiden untersucht werden. Stock et al. raten zur Verwendung eines Linearschallkopfes, um feine Nierenstrukturen höher aufzulösen [Stock 2017].

3.2.13. Retrograde venöse Nierenperfusion

Das kleine Arterienlumen der Niere Nr. 5.1 ließ sich nicht mit der Knopfkanüle (1,2 mm) sondieren, so dass alternativ eine venöse Kanülierung vorgenommen wurde. Über diesen Zugang wurde die Niere retrograd wie in „Material und Methoden“ beschrieben gespült. Die zugesetzte Heparindosis betrug 25.000 IE.

Während der Spülung fällt eine deutliche Ballonierung der kanülierten Vene auf. Aus der A. renalis tritt während des retrograden Spülvorgangs Blut aus (Abb. 33A).

B-bildsonographisch ist die Niere intakt.



A
Abb. 33 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) der retrograden venösen Nierenperfusion der Niere Nr. 5.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200). Die im Vergleich zur Arterie wandschwächere Vena renalis ist durch die Schwerkraftinfusion balloniert; während der Heparinspülung tritt Blut retrograd aus der Arteria renalis ins Wasserbad aus **A**. Im Standbild der retrograden venösen Perfusion in querer Schallebene stellt sich das zentral gelegene Nierenbeckenkelchsystem kontrastfrei dar; die darum gelegenen kontrastierten Vv. segmentares sowie einzelne Interlobärvenen bilden einen sternenförmigen Kranz. Im linken unteren Quadranten ist die Rinde mikrobläschenfrei und somit infarziert **B**.

Im CEUS kann nicht das gewohnte Einstromverhalten der Mikrobläschen wie bei einer arteriellen Perfusion beobachtet werden.

Die Mikrobläschen kontrastieren die dem Nierenbeckenkelchsystem nahen Vv. segmentaris. Im Querschnitt stellt sich dies als ein um das Nierenbeckenkelchsystem

gelegener Sternenkranz dar: im Zentrum das nicht kontrastierte Nierenbecken, die darum kranzförmig angeordneten Segmentvenen und die von dort radial ausstrahlenden, retrograd perfundierten Interlobärvenen. Dieses sternenkranzartige Kontrastmuster gleicht den oben beschriebenen Bildern der arteriellen Parenchyminfarkten (Abb. 33).

Einzelne Mikrobubbles lassen sich bis an die Kapsel - die Vasa corticales kontrastierend - verfolgen.

Im dargestellten Querschnitt in Abb. 33B ist das linke untere Parenchymviertel nicht kontrastiert. Ebenso fehlt in Abb. 34 die Kontrastierung des am linken Bildrand gelegenen Nierenpols. Dieser Befund muss in vitro und in vivo als Thrombosierung der Parenchymgefäße interpretiert werden. Aussagen zu einem möglichen Kontrastverhalten in vivo sind jedoch nur eingeschränkt möglich, da bisher keine in-vivo-Untersuchungen einer retrograden Ultraschallkontrastmitteldarstellung der Nierenvenen als Vergleich vorliegen.

Entsprechend der retrograden Perfusion tritt in dieser Untersuchung das Kontrastmittel über die Arterie in das Wasserbad aus.



Abb. 34 Kontrastverstärkter Ultraschall (CEUS) der retrograden venösen Perfusion der Niere Nr. 5.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 2,5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:200). Der in der Abbildung linksseits gelegene Nierenpol ist im Kortex auch 2:33 Minuten nach Infusionsbeginn nicht retrograd kontrastiert **A**. Nach insgesamt 4:33 Minuten Untersuchungszeit können trotz einer Bildvergrößerung keine Kontrastbläschen im Kortex gesehen werden. Nur einzelne Vv. corticales rectae sind kontrastiert. In der Echtzeitdarstellung stocken die Mikrobläschen in diesen Gefäßten **B**.

3.2.14. Auswirkung unterschiedlicher Kontrastmitteldosen und -konzentrationen

In der humanmedizinischen Anwendung werden zur Kontrastmittelsonographie mit SonoVue® nach Fachinformation und Literatur ein jeweiliger Bolus von 1,2 bis 2,4 ml intravenös injiziert. Dies entspricht bei einem 70 kg schweren Probanden einer Kontrastmittelmenge von 17 bis 34 µl/kg Körpergewicht [Hyvelin 2017].

Die gewählte Kontrastmittelmenge ist in der Simulation jedoch nicht vom Gewicht eines kreislaufintakten Organismus abhängig, sondern von der Konzentration in der NaCl 0,9%-Lösung durch deren Infusion die Perfusion eines entnommenen Organs simuliert werden soll.

Weiterhin muss die Kontrastmittelgabe, im Gegensatz zur Anwendung in einem intakten Kreislaufsystem, nicht als Bolus, sondern als kontinuierliche Infusion erfolgen.

Stenberg et al. simulierten einen Perfusionskreislauf in einem Schweinenierenmodell zur präoperativen Beurteilung der Nierentransplantat-Perfusion mittels kontrastverstärkter Sonographie (CEUS) in einem Lifeport Kidney Transporter (LKT-100-P, Organ Recovery Systems, USA). Dieser wird in der Transplantationsmedizin zur kontinuierlichen hypothermischen, maschinellen Perfusion von Transplantatnieren genutzt.

Zur Kontrastierung wurden 0,5 ml SonoVue® zu 1000 ml Perfusatlösung [Organ Recovery Systems] des in sich geschlossenen maschinellen Perfusionskreislaufes gegeben; einer Konzentration von 1:2000 entsprechend [Stenberg 2011].

Im hier untersuchten Modell wurden zunächst 5 ml SonoVue® als Zusatz in die Infusionsmenge von 500 ml gegeben; einer Konzentration von 1:100 entsprechend.



A

B

Abb. 35 Auswirkungen hoher Kontrastmitteldosis und -konzentration: CEUS der Niere Nr. 2.1 **A** und Nr. 4.1 **B** mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:100). Im Längsschnitt der Niere Nr. 2.1 stellt sich das Parenchym als fleckig konfluierende Fläche ohne Gefäßstruktur dar **A**.

Trotz Nutzung einer Vergrößerung lassen sich wegen der Überstrahlung durch die hohe Kontrastmittelkonzentration Details der Vaskularisation nicht darstellen **B**.

Trotz gewählter niedriger Schallverstärkung wurde der Kontrast überzeichnet und feine Gefäßstrukturen ließen sich nicht darstellen. Der Bildeindruck entsprach eher einer fleckigen und unscharf konturierten Wiedergabe [Dietrich 2017, 2016].

In geringerer Konzentration von nur 1:200 bei Zugabe von 2,5 ml SonoVue® in 500 ml der Infusion stellt sich die Vaskularisation bei gleichen Geräteeinstellungen deutlich zarter und schärfer dar.

Diese Konzentration des Ultraschallkontrastmittels ist im Vergleich zu Stenbergs et al. 10fach höher, führt aber zu vergleichbar guten Bildeindrücken wie in den von ihnen publizierten Abbildungen. Stenbergs Nierenmodell wird durch einen geschlossenen Kreislauf perfundiert. Das hier vorgestellten Modell beruht auf einer offenen Perfusion und bedarf deswegen einer höheren Kontrastmitteldosis.

3.2.15. Auswirkung des Kontrastmittelaustritts in das Wasserbad

Das Ultraschallkontrastmittel tritt während des Versuchs in das umgebende Wasserbad aus.

In der ersten Kontrastuntersuchung über die Nierenvene; im Falle der venös kanülierten und retrograd kontrastierten Niere 5.1 entsprechend über die Nierenarterie. In der zweiten Kontrastuntersuchung nach Traumasetzung zusätzlich auch über die jeweilige Verletzung selber.

Die Versuchsanordnung simuliert die klinischen Situation einer Organblutung: In-vivo wird in der frührarteriellen Phase nur das untersuchte Organ kontrastiert und der mit der Blutung einhergehende Kontrastmittelaustritt kann lokalisiert werden, da das umgebende, weniger stark perfundierte retroperitoneale Gewebe deutlich weniger und erst im Verlauf der Untersuchung zunehmend kontrastiert wird.

Durch die höhere Konzentration der Mikrobläschen in den Organgefäßen und am Ort des Austritts aus der Verletzung bleibt im Model auch bei zunehmender Mikrobläschedichte in der Spülösung dennoch in allen Fällen die Lokalisierung möglich.



Abb. 36 Auswirkung des Kontrastmittelaustritts in das Wasserbad: CEUS der verletzten Niere 4.1 mit einem mechanischen Index (MI) 0,06, Kontrastverstärker 5 ml SonoVue®/500 ml NaCl 0,9%-Infusion (1:100). Nach einer Untersuchungszeit von 4:43 Minuten kann die ins Wasserbad austretende Kontrastmittelfahne deutlich detektiert werden.

Im Falle einer Blutung mag sich bereits ein Hämatom um das zu untersuchende Organ gebildet haben. Dieser klinischen Situation kommt das Simulationsmodell durch das Wasserbad noch näher. Im Hämatom befinden sich zu Untersuchungsbeginn keine Kontrastbläschen. Ebenso verhält es sich im Versuch: durch den Wechsel des Wasserbades befinden sich um die nun verletzte Niere zunächst auch

noch keine Mikrobläschen. Wie *in vivo* treten sie durch die Verletzung in die umgebende Flüssigkeit ein und sind in dieser leicht auszumachen.

In Abb. 36 lässt sich trotz der im Wasserbad ansteigenden Konzentration der Mikrobläschen auch nach einer Untersuchungszeit von 4:43 Minuten die austretende Kontrastmittelfahne deutlich darstellen.

Die Kontrastmittelkonzentration entspricht bei Verwendung der höheren Dosis von 5 ml SonoVue® und kompletter Infusion der 500 ml NaCl 0,9%iger-Trägerlösung im Wasserbad von 4500 ml maximal 1:1000 (0,001 ml SonoVue®/ml Wasserbad). Durch die niedrigere Dosis von 2,5 ml SonoVue® reduziert sich die Konzentration auf 1:2000 und nähert sich der Verteilung in einem normalen Blutvolumen an.

Blutungen oder Infarkte lassen sich unabhängig von der Kontrastmitteldosierung und der dadurch bedingten Darstellungsgüte der Nierenperfusion diagnostizieren.

Durch die kontinuierliche Kontrastmittelinfusion sind längere Untersuchungszeiten als *in vivo* mit einzelnen Kontrastmittelboli möglich.

3.3. Kosten

Die in „2. Material und Methode“ in den Kapiteln „2.1.6 Präparation, Spülung und Transport der Kadavernieren“ und „2.1.7 Vorbereitungen zur Ultraschalluntersuchung“ aufgeführten Kosten der Einzelverbrauchsmaterialien berechnen sich aus den Einkaufspreisen der Zentralapotheke des Bundeswehrkrankenhauses Ulm, Oberer Eselsberg 40, 89081 Ulm.

Anschaffungspreise des Ultraschallsystems oder anderer Geräte, wie Tiefkühle und Kühlschrank wurden nicht einbezogen. Auch andere Gebrauchsgegenstände wie der Infusionsständer, der Standkorb, chirurgisches Instrumentarium zur Präparation oder die Schüssel zur Nierenspülung wurden nicht berechnet.

In Summe belaufen sich die Kosten der hier verwendeten medizinischen Einmalverbrauchsutensilien auf 105,38 € pro präparierter und untersuchter Niere.

Dabei muss in der Zusammenstellung der Tbl. 1 „Einzelverbrauchsmaterialliste für den Transport und zur Präparation“ bedacht werden, dass beide Dosisanwendungen von 5.000 IE und 25.000 IE des Heparins angegeben wurden. Abhängig von der Dosisauswahl ergibt sich ein Preisunterschied von 1,09 €. Die Nierenspülung mit der hohen Heparindosis von 25.000 IE führte zu besseren sonographischen Ergebnissen und sollte bevorzugt werden.

Durch die Mengenangabe des Ultraschallverstärkers SonoVue® mit einer Einzelflasche von 5 ml sind beide Dosisanwendungen mit 2,5 ml oder 5 ml möglich. Durch die Kontrastdosis von 2,5 ml lassen sich qualitativ bessere Bildbefunde darstellen. Somit lassen sich mit einer einzelnen Kontrastmittelflasche zum Preis von 74,80 € zwei Nieren untersuchen und die Kosten für SonoVue® im Modell halbieren, so dass die Kosten pro Simulation bei 67,98 € liegen.

4. Diskussion

Der Ausbildungsbedarf zur Erlangung sonographischer Grundkenntnisse um eine FAST suffizient durchführen zu können, ist hoch. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Auszubildenden in der notfallmedizinischen Versorgung als auch die erforderliche individuelle Ausbildung [Hertzberg 2000, Blehar 2015].

Um eine Sonographie kompetent ausführen zu können, müssen Kenntnisse zur Indikationsstellung, den Grundlagen der Technik und der Gerätebedienung zur Bildoptimierung, des systematischen Untersuchungsablaufs, der Bildinterpretation, der Dokumentation und der klinischen Befundkonsequenz erworben werden [Tolsgaard 2013].

Die empfohlenen Richtzahlen zur Erlangung der Facharztkompetenzen in den notfallmedizinisch involvierten Fachrichtungen sind in der derzeitigen Musterweiterbildungsordnung der Bundesärztekammer weit gestreut.

In der Allgemeinchirurgie werden 400 Abdomensonographien und 200 Untersuchungen des Urogenitaltraktes sowie zusätzlich 50 eFAST-Befunde empfohlen.

In der Unfallchirurgie werden mindestens 300 nicht näher spezifizierte Ultraschalluntersuchungen inklusive 50 eFAST-Befunde gefordert. In der Inneren Medizin sollen mindestens 400 Abdomensonographien absolviert werden; in der Radiologie insgesamt 800 Untersuchungen aus allen Organbereichen. In der Anästhesie werden 50 Ultraschallanwendungen bei Gefäßzugängen oder bei Verfahren der Regionalanästhesie verlangt [Bundesärztekammer 2018].

Hertzberg et al. leiten aus ihrer Studie zur Qualität der Ultraschalluntersuchung radiologischer Assistenzärzte im ersten Weiterbildungsjahr im Vergleich zu erfahrenen Radiologen ab, dass 200 oder weniger durchgeführte Untersuchungen nicht genügen um eine ausreichende sonographische Kompetenz zu erlangen. Bemerkenswerterweise sollte in dieser Studie geklärt werden, ob die geforderten Fallzahlen des American Institute of Ultrasound in Medicine und des American College of Radiology „*substanziell abgesenkt*“ werden können [Hertzberg 2000].

Untersuchungszahlen zur FAST sind in der Musterweiterbildungsordnung nur in der Chirurgie präzisiert und separat aufgeführt. Sie liegen mit 50 Untersuchungen deutlich unter der von Blehar et al. beobachteten Lernkurve von mindestens 183 fokussierten Traumasonographien um die 90%ige Bildqualität eines Experten zu erreichen [Blehar 2015].

Der Arbeitskreis Notfallsonografie der Deutschen Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin (DEGUM) bildet in einem mehrstufigen Ausbildungskonzept zur Zertifizierung durch die Gesellschaft aus. Hierzu müssen kursvermittelt Basiskenntnisse der erweiterten FAST-Untersuchung erworben werden, die durch einen ergänzenden curricularen Ausbildungsgang vertieft werden. Hierzu ist der Nachweis von mindestens 200 eigenverantwortlich durchgeführten Ultraschalluntersuchungen in der Notfallsonographie, davon 20 % mit Pathologien, erforderlich. Diese Befunde müssen durch einen Supervisor bestätigt oder durch ein anderes bildgebendes Verfahren oder einen Operationsbericht belegt werden.

Im Kurscurriculum wird ein praktischer Übungsanteil von mindestens 50% gefordert. Ist dieser aus ethischen Gründen am Patienten nicht möglich, sind alternativ Life-Demonstrationen, Simulator- oder Videodemonstrationen mit Diskussion alternativ zugelassen. Bemerkenswerterweise sei herausgestellt, dass der Aufbaukurs des Curriculums bereits den kontrastverstärkten Ultraschall beim Abdominaltrauma beinhaltet [Arbeitskreis Notfallsonographie DEGUM].

Wie sich die Ultraschalldiagnostik optimal lehren und lernen lässt, ist evidenzbasiert nicht belegt. Belastbare Daten aus randomisierten Studien fehlen.

Østergaard et al. fanden in insgesamt 262 Publikationen zur Effektivität simulationsbasierter Ausbildung in der Abdomensonographie nur 17 verwertbare Studien. Aber auch in diesen siebzehn Studien erreichte keine den höchsten Evidenzgrad. Es konnten nur vier randomisierte kontrollierte Studien, weitere acht Interventionsstudien mit Bewertungen vor und nach den Trainings und fünf Beobachtungsstudien zur Auswertung selektiert werden. Die Studien waren insbesondere hinsichtlich der angewandten Simulation, der Übungsteilnehmer, des Designs und der Zielvorgaben sehr heterogen. Auffällig ist, dass von den vier randomisierten Studien drei der FAST-Simulation dienen [Salen 2001, Damewood 2011, Chung 2013].

Die Untersuchungen wurden in diesen drei Studien entweder an gesunden Probanden oder an virtuelle Realitäten darstellenden Ultraschallmodellen durchgeführt. Die simulatorbasierte Ausbildung verbesserte die Untersuchungsergebnisse der Teilnehmer gegenüber Untersuchungen gesunder Probanden nicht [Østergaard 2016]. Dies bedeute aber auch, dass die Simulation pathologischer Befunde nicht effektiver ausbildet als das Lernen am gesunden Probanden.

Die erhobene Evidenz war in allen siebzehn Studien unzureichend. Weiterhin finden sich keine Hinweise, ob Simulationsausbildungen zur Verbesserung in der klinischen Anwendung führen [Østergaard 2016].

Dennoch finden Simulationsausbildungen eine hohe Akzeptanz bei den Lernenden. Insbesondere die Möglichkeit, in kurzer Zeit eine Vielzahl pathologischer Befunde darstellen zu können, wird als wesentlicher Vorteil der Simulationsausbildung genannt [Holtmann 2010, Terkamp 2006]. Denn es bedarf eines langen Einsatzes im Ultraschalllabor um eine ausreichende Anzahl an Pathologien zu sehen.

Pathologische Ultraschallbefunde in kurzer Zeit kompakt und in der erforderlichen Breite hinsichtlich ihrer Häufigkeit und Dringlichkeit darzustellen, gelingt nur durch Falldarstellungen in Kursformen.

Pathologietraining am Patienten ist jedoch aus verschiedensten Gründen in einem Kursangebot schwierig zu realisieren: neben der erklärten Bereitschaft zur Teilnahme sind als Hinderungsgründe hygienische Bedenken, Schmerzzustände, Patientendatensicherheit und andere Aspekte der Patientenautonomie wie auch das Anrecht auf eine indizierte und korrekt durchgeführte Untersuchung zu nennen; nicht zuletzt auch der praktische Aspekt, dass pathologische Befunde zum Zeitpunkt einer Ausbildung schlichtweg nicht zur Verfügung stehen [Holtmann 2010]. Dies gilt um so mehr für notfällige Krankheitsbilder.

Hieraus lässt sich unmittelbar der Bedarf zur möglichst wirklichkeitsgetreuen Simulationen ableiten; wiewohl bisher nicht versucht wurde, evidenzbasiert zu belegen, dass sich hierdurch die Lernkurve verkürzt.

Ultraschallbildvolumina pathologischer Befunde aus Patienten zur späteren Einspielung in Simulationsgeräte zu gewinnen, stellt deswegen die gängige Alternative dar. Hierzu müssen aber ebenso patientenbezogene und technische Hindernisse überwunden werden.

Die zeitaufwändig Aquisition eines dreidimensionalen Bildvolumens erfolgt in der Regel während der Befunderhebung und führt zur Verzögerung im Routinebetrieb des Ultraschalllabor. Wie in der direkten Schulung am Patienten, darf die Erfassung von Notfallbefunden die Patientenversorgung nicht verzögern.

Durchgängig wird von den Teilnehmern die reduzierte Bildqualität, die durch die Übertragung der Originalbilder in die Simulationsmodelle erlitten wird, bemängelt [Holtmann 2010, Terkamp 2006]. Dies stellt in der Simulationstechnik ein gewisses Paradoxon dar, da die Bilddarstellung durch die Ausbildung verbessert werden soll jedoch Veränderungen der Bildeinstellung und -optimierungen in den aufgespielten Ultraschallvolumina nicht möglich sind. So kann die Gerätebedienung und Bildoptimierung als ein wesentlicher Anteil der Ausbildung nicht am Simulator trainiert werden. Weiterhin werden durch die Mehrzahl der Verfahren nur B-Bildsonographien virtuell simuliert. Dynamische Darstellungen, insbesondere zur Untersuchung der Vaskularisation und damit der Perfusion, sind nicht oder nur mit einem erheblichen Realitätsverlust möglich.

Im hier etablierten CEUS-Modell kommt es zu keinem Verlust der Bildqualität, da mit im täglichen Gebrauch befindlichen high-end-Ultraschallgeräten untersucht werden kann und keine Übertragung in ein Simulationsvolumen erfolgen muss. Der Lernende kann am Ultraschallsystem die Gerätetechnik und den Umgang mit dem Kontrastmedium trainieren. Die geräte- und untersuchungsbezogene Lernsituation entspricht somit den Untersuchungsbedingungen im Ultraschalllabor. Dies beinhaltet im CEUS-Modell auch das Einüben der Dokumentation durch Videoaufzeichnungen.

Die Nutzung des vorhandenen Ultraschallsystems erspart weiterhin die durch Østergaard et al. als nachteilig aufgeführten, nicht unerheblichen Anschaffungskosten von Simulationsgeräten und deren Wartung [Østergaard 2016]. Auch entfällt

der Aufbau und die Pflege der erforderlichen Bilddatensammlung und deren anonymisierte Speicherung.

Unabhängig von der gewählten Lehrmethode bleibt die Ultraschallausbildung sowohl für den Lernenden, als auch für den Lehrenden zeitaufwändig [Kratzer 2000, Østergaard 2016]. Stete Fortbildung in umfangreichen Kursprogrammen sind außerhalb der regulären Arbeitszeiten erforderlich um Untersuchungskompetenzen und Zertifizierungen zu erlangen und zu erhalten [Arbeitskreis Notfallsonographie DEGUM].

Das in dieser Arbeit etablierte Simulationsmodell zur kontrastverstärkten Ultraschalluntersuchung bietet durch die Verwendung im Arbeitsalltag eingesetzter Ultraschallsystem neben den gerätebezogenen Vorteilen wie erhaltene Bildqualität, praktische Ausbildung der Gerätetechnik und Dokumentation, zusätzlich den Vorteil der kompletten Patientenunabhängigkeit.

Es müssen weder erkrankte Patienten für den Zeitraum der Ausbildung aquiriert noch bei früheren Gelegenheiten Ultraschallvolumina bei diesen aufgenommen werden.

Im Modell kann im Gegensatz dazu die Bereitstellung der Kadavernieren zum Zeitpunkt einer Ausbildung durch Auftauen, wie beim Nierenpaar Nr. 1.1 und 1.2, geplant werden oder durch Terminierung eines Kurses nach einer Treibjagd, wie es bei den insgesamt acht am 10.12.2019 entnommenen Nieren möglich gewesen wäre.

Die auf 3-D-Bildvolumina basierte Simulation ermöglicht technisch bedingt nur die Simulation eines einzelnen pathologischen Befundes in einem abdominalen Quadranten und schränkt so die Einübung eines systematischen Untersuchungsablaufs ein. [Holtmann 2010, Tolsgaard 2013].

Auch im Nierenmodell kann keine vollständige Abdomensonographie gelehrt werden. Jedoch können verschiedene klinische Situationen simuliert werden: die im Modell etablierte kontrastverstärkte Ultraschalluntersuchung stumpfer und penetrierender Nierenverletzungen mit Blutungsnachweis, neben der Makro- auch die Mikroperfusion der Niere und damit auch Infarkte im Nierenparenchym.

Die bildgebende Diagnostik zum abdominalen Blutungsnachweis oder zu Durchblutungsstörungen der Parenchymorgane ist perfusionsabhängig. Der direkte Nachweis ist in der FAST nicht möglich und der indirekte, über abdominale freie Flüssigkeit geführte Blutungsnachweis ist wenig sensitiv [Stengel 2001, Stengel 2005, Stengel 2015].

Deswegen muss die B-bildsonographisch-basierte FAST zwangsläufig der kontrastmittelnutzenden CT-Diagnostik und der invasiven Angiographie unterliegen [Thorelius 2004].

Ultraschallkontrastmittel gleichen diese Schwäche der B-Bildsonographie in der Perfusionsdiagnostik aus. So erreicht der kontrastverstärkte Ultraschall (CEUS) eine Sensitivität von 69% [Catalano 2009] bis 100% [Clevert 2008, Tagliati 2019] hinsichtlich der Erkennung von Parenchymorganverletzungen und Blutungen und liegt damit deutlich über der der FAST mit 22% [Carter 2015] bis 84% [Brown 2009] und 88% [McKenney 1996].

Wiederholt wurde versucht, Vorteile der FAST-Untersuchung für häodynamisch stabile oder instabile Unfallopfer - auch abhängig von der Schwere der Verletzung - zu belegen [Miller 2003, Stengel 2005, Becker 2010, Carter 2015, Dammers 2017, Rowell 2019]. Dies vor allem vor dem Hintergrund, ob bei stabilen Patienten Zeit zur Ultraschalluntersuchung bleibt und eine Kontrastmittel-CT vermieden werden kann oder ob bei instabilen Patienten durch die FAST Zeit in der dringlichen Versorgung durch die Umgehung der CT-Diagnostik eingespart werden kann.

Miller et al. empfehlen in ihrer prägnant betitelten Arbeit „Not so FAST“ bei der von ihnen nachgewiesenen 42%igen Sensitivität der FAST, die CT-Diagnostik bei häodynamisch stabilen Patienten um keine falsch-negativen Befunde zu übersehen [Miller 2003].

Deutlich später untersuchten Rowell et al. 2019 an retrospektiven Datensätzen aus zehn US-amerikanischen Traumazentren die Sensitivität der FAST bei Patienten, die bereits in der Notversorgung Blutkonserven erhielten. In dieser, somit als instabil zu wertenden Patientengruppe, fand sich mit 62% eine der niedrigsten in der Literatur beschriebenen Sensitivitäten.

Da in der Gruppe der falsch-negativen FAST-Untersuchungen durchgeführte Peritoneallavagen in 21 von 22 Fällen eine intraabdominale Blutung - durch Laparotomie bestätigt - diagnostizierten, raten die Autoren zur Lavage bei hypotensiven, abdominal-traumatisierten Patienten.

Becker et al. konnten nachweisen, dass trotz schwerer Verletzungsmuster mit einem Injury-Severity-Score (ISS) von über 25 die Sensitivität der FAST mit 65,1% in dieser Gruppe deutlich unter derer mit niedrigeren Verletzungs-Scores lag (ISS 16-24: 80,4%) [Becker 2010].

Die Sensitivität der FAST hängt entscheidend von deren Durchführung ab: welche abdominellen Kompartimente und Räume wurden in welchen Schnittebenen untersucht. Osterwalder et al. erklären die breit gestreute Sensitivität bei jedoch durchgehend hoher Spezifität der FAST durch unterschiedliche Untersuchungsabläufe. Verbesserungen sind vor allem durch die Ultraschalluntersuchung am kaudalen Lebrrand [Lobo 2017], der subphrenischen Räume [Srinualnad 1999] und der parakolischen Rinnen zu erreichen, denn Blut sammelt sich nicht nur an den tiefsten Punkten des Abdomens. Die Lokalisation der Flüssigkeitsansammlungen ist auch von der Anatomie, dem Ort der Blutung, der Atemmechanik und möglichen Vorerkrankungen im Abdomen abhängig [Osterwalder 2019]. Zuletzt sei wiederholt darauf hingewiesen, dass eine einzelne initiale Ultraschalluntersuchung nicht ausreicht. Der Traumapatient muss, gleich wie er permanent kreislaufüberwacht wird, wiederholt sonographiert werden, damit Veränderungen wie die Zunahme freier Flüssigkeit im Abdomen erkannt werden [Kanafi 2014].

In der Einordnung dieser divergenten Literaturangaben zur Sensitivität der FAST sollte der Zeitpunkt der unterschiedlichen Datenerhebungen und die seither fortgeschrittene CT-Diagnostik durch Multislice-Techniken mit verkürzten Untersuchungszeiten und die mittlerweile übliche Integration der Computertomographen in den Schockraum beachtet werden [Thorelius 2004, Stengel 2001].

In diesem Sinne muss aber auch der Fortschritt in der Ultraschalldiagnostik durch die Kontrastverstärker der 2. Generation bedacht werden. Anders als bei der Computertomographie wurde nicht durch Technik und räumliche Annäherung an den Patienten

eine Verbesserung erreicht, sondern durch die Einführung des Kontrastmediums selber.

Dieses hat der statischen, Echogenitäten beschreibenden B-Bildsonographie die dynamische Feinheit des Blutflusses hinzugefügt wie es die farbkodierte Dopplersonographie und die Schnittbildverfahren bisher in Echtzeit nicht konnten.

Letztlich stellt sich nicht die Frage, ob CEUS die CT ersetzen kann, sondern ob nicht die FAST durch CEUS ergänzt oder gar ersetzt werden sollte.

Die charakteristischen, durch den kontrastverstärkten Ultraschall erhebbaren posttraumatischen Befunde sind bereits im Tiermodell [Lin 2013, Lin 2015] und klinisch beschrieben worden.

Kontusionen stellen sich als Vaskularisations- und Perfusionsdefekt mit umgebend erhaltener Perfusion des Parenchyms dar. Lazerationen werden als echofreie Diskontinuität der Organstruktur bei erhaltener Perfusion der umgebenden Organteile beschrieben. Persistierende Blutungen sind durch Extravasation der Mikrobläschen gekennzeichnet. Sie sammeln sich außerhalb der verletzten Organe in den umgebenden abdominalen Kompartimenten. Dieses Verhalten wird auch als „pooling“ bezeichnet [Schmiedl 1999, Catalano 2003, Clevert 2008, Cokkinos 2012]. Parenchyminfarkte der Milz, Leber und Nieren sind durch mikrobläschenfreie Abschnitte erkennbar, deren Konfiguration sich durch die jeweils okkludierte, organtypische Vaskularisation anatomisch erklären lässt. Intrakapsuläre Hämatome ohne fortbestehende Einblutung stellen sich ebenso ohne Kontrastmittelstrom dar, verdrängen aber im B-Bildmodus das Organparenchym und sind unmittelbar nach der Einblutung echofrei [Catalano 2004, McGahan 2006, Regine 2007, Valentino 2009, Greis 2009, Cokkinos 2012, Pinto 2014, Miele 2016, Cocolini 2017, Stock 2017, Sidhu 2018, Trinci 2019].

Im Organmodell lassen sich diese posttraumatischen Befundkonstellation durch den Lernenden nachvollziehen, der Umgang mit dem Kontrastmedium einüben und die Gerätetechnik sowie die Dokumentation werden erlernt.

Die simulierte kontrastverstärkte Ultraschalluntersuchung des Nierentraumas ermöglicht weiterhin den didaktischen Transfer in andere klinische Situationen.

Hierzu gehören die durch CEUS verbesserte Traumadiagnostik von weiteren Organverletzungen und -blutungen und die gezielte Sonographie am Patientenbett, wie zum Beispiel auf der Intensivstation, ohne dass der Patienten zur Schnittbildagnostik transportiert werden muss sowie die ultraschallbasierte Perfusionagnostik unter Vermeidung nephrotoxischer Substanzen oder Röntgenstrahlen [Stock 2017, Putz 2017].

Catalano et al. halten CEUS in verschiedenen klinischen Szenarien für ein zukünftig alternatives Diagnostikum. In Einklang mit den oben genannten Einsatzoptionen zum Beispiel bei isolierten niedrigenergetischen, stumpfen Abdominal- oder Flankentraumen wie nach Sport- oder Reitunfällen, Stürzen oder geringfügigen Fahrradunfällen. Ebenso ist die bettseitige Untersuchung in ausgewählten Fällen in der Schockraumbehandlung denkbar. Bei nicht stabilisierbaren Patienten soll eine CEUS erwogen werden. Auch als Ergänzung oder statt einer CT soll der kontrastverstärkte Ultraschall zur Anwendung kommen: bei Kontraindikation der Röntgenkontrastmittel, fehlgeschlagenen CT-Untersuchungen oder unklarer Befundlage. Sidhu et al. fassen diese alternativen Indikationen zum CT im hämodynamisch stabilen Patienten mit einem isolierten stumpfen Niedrigenergie-Trauma, insbesondere bei Kindern zusammen [Sidhu 2018].

Die hauptsächliche und zukünftige Indikation zur CEUS sehen Catalano et al. in der Nachuntersuchung nicht-operativer Verläufe nach Abdominaltraumen [Catalano 2009].

Die Simulationsausbildung am Modell trägt zur sicheren Handhabung des kontrastverstärkten Ultraschalls bei und rückt den CEUS als alternative Bildgebung ins Bewußtsein des Anwenders.

Grundsätzlich ist der Einsatz des kontrastverstärkten Ultraschalls in der Traumadiagnostik und -versorgung in drei Variationen denkbar:

1. als Ergänzung des FAST-Konzepts vor der CT-Diagnostik, 2. ersetzt CEUS die FAST-Untersuchung und 3. CEUS zur Einsparung der Kontrastmittel-Computer-tomographie in der initialen Diagnostik, in der Nachuntersuchung und als Ersatz bei CT-Ausfällen.

Somit lassen sich auch die jeweiligen Zeitpunkte in den Traumaalgorithmen zum Einsatz des kontrastverstärkten Ultraschalls festlegen. Letztlich stellt sich dann die Frage, ob unter dem Druck der Traumaversorgung Zeit für eine kontrastverstärkte Ultraschalluntersuchung bleibt.

Betrachtet man die im TraumaRegister DGU® in Kapitel 4.2.3 „Dauer von Aufnahme im Schockraum bis zur Not-OP bei penetrierendem Trauma“ tatsächlich dokumentierten Versorgungszeiten der penetrierenden thorako-abdominalen Verletzungen, sollte diese Zeit zur Verfügung stehen [TraumaRegisterDGU® 2019]. Für die Jahre 2014 bis 2018 wird dort die mittlere Zeit bis zur Operation mit 61 bis 65 Minuten angegeben. Auch Verläufe mit einer Zeitspanne von mehr als 120 Minuten bis zur Operation wurden erfasst, wurden jedoch aus der Analyse ausgeschlossen.

Im Jahr 2018 wurden im TraumaRegister DGU® 83,5% (n=24.815) aller primär versorgten Traumapatienten (n=29.894) abdominal sonographiert; 79,5% wurden zusätzlich Ganzkörper-CT-graphisch untersucht (n=23.615).

Bei Traumapatienten die keine Computertomographie als primäre Bildgebung erhielten (n=2522) wurde in 77% der Fälle eine FAST durchgeführt (n=1947).

Somit ist die Ultraschalluntersuchung an sich ein fester und damit zeitlich integrierter Bestandteil der Traumaversorgung.

Offensichtlich führt die FAST zur Einsparung von CT-Untersuchungen und kann einen Zeitgewinn im Versorgungsablauf bedeuten. Dass durch komplett Ultraschalluntersuchungen des Verletzten die Anzahl der CT-Untersuchungen gesenkt werden kann, konnten Dehqanzada et al. bei insgesamt 19128 Patienten nach einem stumpfen Bauchtrauma eindrücklich zeigen. In 58% aller Fälle konnte eine CT vermieden werden und insgesamt 42% der erwarteten Röntgenstrahlenexposition sowie die damit verbundenen Kosten eingespart werden [Dehqanzada 2015].

In der Vergangenheit führte eher die Computertomographie zu einer Verzögerung, denn im Jahre 2004 folgert Thorelius et al. auf Basis der von Stengel et al. 2001 ausgewerteten Daten aus 30 Studien mit insgesamt 9047 Patienten, dass die Schnittbildgebung mittels CT zwar zu einer leichten Verzögerung im Versorgungs-

ablauf führe und deswegen nur bei stabilen und kooperativen Patienten angewendet werden sollte, dieser zeitliche Verzug, aber durch die hohe Sensitivität zu rechtfertigen sei [Stengl 2001, Thorelius 2004]. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung vor 2001 und auch zum Zeitpunkt des Kommentars in 2004, waren die Computertomographen noch nicht allerorten in die Schockräume integriert.

Dehqanzada et al. veranschlagen in ihrer Studie an insgesamt 12577 Patienten die durchschnittliche Dauer der kompletten B-Bildsonographie beim Trauma mit 3 bis 5 Minuten [Dehqanzada 2015].

Für die kontrastverstärkte Ultraschalluntersuchung des stumpfen Bauchtraumas müssen nach der Darstellung von Catalano et al. bis 7 Minuten eingeplant werden.

Die Gesamtdosis des Kontrastverstärkers wird auf zwei Einzeldosen von 2,4 ml SonoVue® aufgeteilt. Mit der ersten Bolusinjektion wird im rechten Abdomen die rechte Niere und nachfolgend die Leber in einer bis zu 3 Minuten untersucht. Nach der Injektion der zweiten SonoVue®-Dosis werden die linksseitigen Organe in weiteren 3 bis 4 Minuten fokusert untersucht: die linke Niere, das Pankreas und zum Abschluss die Milz [Catalano 2009].

Wird die FAST durch eine CEUS ergänzt oder gar ersetzt, müssten in der Traumaversorgung nach den Angaben von Dehqanzada und Catalano durchschnittlich zwei Minuten zusätzlich eingeplant werden.

Die Befunderhebung freier abdominaler Flüssigkeit wie sie bisher gelehrt wird, gelingt leicht wenn die Strukturen des Normalbefundes der abdominalen Räume bekannt sind. Das diagnostische Kriterium der freien, b-bildsonographisch echofreien, im Bildeindruck „schwarzen“ Flüssigkeit lässt sich einfach darstellen. Dieser Befund ist an Bildmaterial didaktisch leicht zu vermitteln [Salen 2001, Damewood 2011, Chung 2013].

Freie Flüssigkeit ohne aktive Einblutung stellt sich in der kontrastverstärkten Sonographie ebenso echofrei und ohne Kontrastmittelbläschen „schwarz“ dar. Dieser Bildeindruck ist dem Lernenden bereits aus der FAST-Anwendung bekannt.

Dem indirekten Hinweis durch freie Flüssigkeit auf eine Blutung folgt der kontrastverstärkte Ultraschall zur Lokalisation der Blutungsquelle aus den Parenchymorganen.

Im hier etablierten CEUS-Modell kann das zur Diagnostik des stumpfen Bauchtraumas erforderliche Kontrastmittelverhalten erlernt werden.

Bis zur Organkontrastierung besteht im Modell keine Wartezeit wie sie im intakten Organismus durch die Kreislaufzeit entsteht; jedoch könnte dies durch die spätere Zugabe des Kontrastmediums in den Infusionsbeutel bewerkstelligt werden.

Die arterielle und medulläre Parenchymkontrastierung der Niere kann wie *in vivo* von Stock et al. beschrieben realitätsnah simuliert werden. Die sonoanatomischen Beobachtungen im Nierenmodell Nr. 5.2 bestätigen dies eindrücklich.

Durch die kontinuierliche Infusion der Mikrobläschen kommt es im Nierenparenchym nicht wie *in vivo* nach vier bis sechs Minuten zur Kontrastmittelauswaschung [Stock 2017, Dietrich 2016]. Dies gereicht der Simulation aber nicht zum Nachteil. Denn hierdurch sind längere Simulationszeiten möglich.

Der Austritt der Kontrastbläschen in das umgebende Wasserbad entspricht der Blutung in die Peritonealräume. Trotz ansteigender Kontrastmittelkonzentration in der Organumgebung ließen sich in allen Simulationsfällen die Blutungsquelle durch die Kontrastmittelfahne lokalisieren.

Die Wahl des Organs Niere als Simulationsmodell hat sich als richtig erwiesen. Die Präparation der Nierengefäße gelang bei 18 der entnommenen 20 Nierenorganen. Die Vaskularisation ist im Vergleich zur Leber mit dem aus A. hepatica und der V. portae bestehenden Durchblutungssystemen leichter zu simulieren. Weiterhin entspricht die Rehniere in der Form und annähernd in der Größe den humanmedizinischen Verhältnissen. Sie ist im Gegensatz zur Milz oder Leber im Wasserbad formstabil und lässt sich unabhängig von ihrer Lage im Wasserbad anatomisch korrekt sonographieren.

Sicherlich sind auch Kadavernieren anderer Tierspezies, insbesondere von Schlachttieren als Simulationsmodell verwendbar. Dabei sollte jedoch bedacht werden, dass z. B. die Form von Rindernieren durch ihre gefurchte Oberflächen-

struktur deutlich von der humanen Niere abweicht; Schweinenieren sind gelegentlich ebenso in ihrer Oberfläche renkuliert. Hinderlich für die Nutzung könnte ihre Entnahme aus dem formalisierten, industrialisierten und lebensmittelhygienisch überwachten Schlachtplatz sein.

Die Nutzung der Reh- bzw. Damwildnieren ermöglichte eine direkte Verarbeitung zur Präparation. Der persönliche Kontakt zum Jagdschützen erleichtert Absprachen zu erforderlichen Entnahmebedingungen wie die Schonung des Gefäßstumpfes.

Unabhängig von der Wahl der Tierspezies bietet sich nach der Entnahme, Präparation und Heparinspülung der Nieren sowie den Vorbereitungen zum Ultraschall die Durchführung des Simulationsunterrichts in Kursform am Folgetag an. Werden tiefgefrorene Organe verwendet, muss die erforderliche Auftauzeit bedacht werden.

Neben dem Modellabstülpung selber können durch die während der Simulation gemachten praktischen Ultraschallfahrungen auch erforderliche Standardschnitte zur Diagnostik von Organverletzung oder Nierenblutungen postuliert werden:

Den besten Gesamtüberblick der Nierenperfusion erhält man durch Einstellung der Schallebene in der Organlängsachse. Der Schallkopf verbleibt ruhig in einer Position, während das Einstromverhalten des Kontrastmittels in der arteriellen und medullären Phase beurteilt wird.

Um eine Blutung aus dem Organ zu erfassen sollte der Schallkopf in einer gleichmäßig langsamen Bewegung quer zur Organachse geführten werden. So können auch auf der ventralen oder dorsalen Nierenoberfläche austretende Kontrastmittelfahnen erfasst werden, die durch Verkippen der Schallebenen in der Längsachse übersehen werden könnten.

Einen Infarkt wird man zum Abschluss der Untersuchung suchen, denn er wird sich nach dem arteriellen Einstrom bis in die Spätphase als kontrastfreies Areal demarkieren.

An den mittels Spülung mit 25000 IE unfractioniertem Heparin vorbereiteten Kadavernieren lassen sich diese Perfusionsbeobachtungen innerhalb von 24 Stunden nach der Entnahme bzw. nach dem Auftauen bei tiefgefrorenen Organen machen.

Wie in der Literatur bereits beschrieben folgt die CEUS auf die FAST-Untersuchung [Catalano 2009, Sessa 2015, Cokkinos 2012, Piscaglia 2012, Nolsøe 2016]. Nach niedrig-energetischen Traumen, die zunehmend in nicht-operativen Konzepten beobachtet werden [Matsevych 2019], hat der kontrastverstärkte Ultraschall die fokussierte Sonographie des Traumas in ihrer Sensitivität von 59 bis 79% auf 94 bis 95% und damit auf das Niveau der CT-Diagnostik gehoben [Catalano 2009, Sessa 2015].

Für den CEUS spricht vor allem die deutliche Anhebung der Sensitivität hinsichtlich der retroperitoneal gelegenen Nieren, deren Verletzung bei fehlender Blutung ins offene Peritoneum durch die FAST übersehen wird [Catalano 2009].

Normalbefunde der FAST bei posttraumatischen und vor allem hypotensiven Patienten sollten per CEUS überprüft werden und nicht - wie von Rowell et al. noch im Jahre 2019 empfohlen - per invasiver Peritoneallavage [Rowell 2019].

Ultraschallverfahren beschleunigen als point-of-care-Methode die klinische Entscheidungsfindung direkt beim Patienten und erleichtern Reevaluationen am Patientenbett; insbesondere dann, wenn Computertomographien nicht möglich oder kontraindiziert sind [Montoya 2016].

Relative Hinderungsgründe zur Röntgenstrahlenanwendung bestehen, abhängig von der klinischen Fragestellung, für Kinder und Schwangere. Die mittlerweile vorliegende Literatur bewertet die Anwendung von SonoVue® in diesen beiden Patientengruppen außerhalb der Zulassungsindikationen als sichere Alternative [Durkin 2016, Sidhu 2018, Armstrong 2018, Trinci 2019, Schwarze 2020, Schwarze 2020]. In der Pädiatrie erspart CEUS patientenkomfortabel - neben der Strahlenexposition zusätzlich - die zur Schnittbildgebung in der Regel erforderliche Sedierung der Kinder.

Die Sonographie ist immer dann die ubiquitär verfügbare alternative Bildgebungs-methode, wenn technische Hinderungsgründe bestehen; dies können CT-Geräteausfälle, limitierte Transportmöglichkeiten über weite Strecken zum Scanner oder auch ein Massenanfall zu untersuchender Verletzter sein, so dass die zeitige Untersuchungskapazität des CT-Goldstandards nicht ausreicht.

Die Problematik des sprichwörtlichen Nadelöhrs der CT-Röhre ist aus militärischen Szenarien bekannt: die Distanz zur medizinischen Versorgungseinrichtung ist weit und bedarf gesicherter Transportkapazitäten und die Untersuchungsreihenfolge der Verletzten muss im Massenanfall priorisiert werden.

Aus diesem Grunde wurde der Nutzen der Sonographie zur Entscheidungsfindung in Militärimissionen wiederholt untersucht [Brooks 2005, Graham 2012, Chung 2013, Smith 2015, Carter 2018, Qi 2020]. Der Ultraschall wird als zentrales Element der Versorgungspriorisierung im Massenanfall hervorgehoben [Franke 2017, Lee 2019]. Das diese aus militärischen Szenarien bekannten Notfallsituationen mit Massenanfällen von Verletzten oder eingeschränkten Transportmöglichkeiten auch hiesige zivile Gesundheitssysteme treffen, haben in den vergangenen Jahren Terroranschläge in den großen europäischen Metropolen von London, Paris, Madrid, Barcelona und Berlin gezeigt.

Wenn unter diesen Bedingungen ein Bildgebungsverfahren als Rückfallopption gewählt werden muss, sollte statt einer alleinigen FAST dem signifikant sensitiveren kontrastverstärkten Ultraschall der Vorzug gegeben werden. Erste Erfahrungen zum Einsatz des CEUS im wehrmedizinischen Umfeld liegen bereits vor [Richter 2019].

Letztlich müssen alle - unabhängig von den oben geschilderten Bedrohungsszenarien - jederzeit damit rechnen, vor die klinisch häufige Herausforderung der Traumaversorgung gestellt zu werden [Nolsøe 2016]. Um dann die FAST durch CEUS ergänzen oder ersetzen zu können, müssen realitätsnahe Simulationsausbildungen konzipiert und angeboten werden.

Das hier vorgestellte Simulationsmodells wird dazu beitragen, dass der kontrastverstärkte Ultraschall ein fester Bestandteil der Traumaversorgung wird.

5. Zusammenfassung

Die Ultraschalluntersuchung nach einem Bauchtrauma ist die erste Bildgebung zur Erkennung lebensbedrohlicher innerer Verletzungen, die einer sofortigen Therapie bedürfen. Innerhalb weniger Minuten kann durch die standardisierte Untersuchung des Bauchraums freie Flüssigkeit als indirektes Zeichen einer Verletzung erkannt werden. Diese Abfolge der fokussierten Sonographie des Abdominalräume ist als sog. „FAST - Focussed Assessment with Sonography for Trauma“ seit nunmehr 25 Jahren in der Traumaversorgung etabliert [Rozycki 1996, Scalea 1999, Stewart 2018] und wird durch die einschließende Untersuchung der Pleuräräume und des Pericards als „eFAST - extended Focussed Assessment with Sonography for Trauma“ bezeichnet.

Dennoch bleibt die kontrastmittelverstärkte Computertomographie als einen Gesamtüberblick verschaffender Goldstandard der Bildgebung bestehen [Clevert 2008]. Denn für die FAST des Abdomens wird in der Literatur eine niedrigere Sensitivität bei allerdings hoher Spezifität berichtet.

Aus Mikrobläschen bestehende Ultraschallkontrastverstärker verbessern die diagnostische Aussagekraft der Sonographie deutlich, so dass sie das Niveau der CT-Ergebnisse erreicht [Sessa 2014, Catalano 2009, Clevert 2008]. Durch sie können - wie in der Kontrastmittel-CT-Diagnostik - zusätzlich Aussagen zur Perfusion gemacht werden. So können nicht nur freie Flüssigkeiten, sondern auch Parenchymorganverletzungen wie Lazerationen, Hämatome oder Kontusionen und vor allem Blutungen erkannt werden [Catalano 2004, McGahan 2006, Regine 2007, Valentino 2009, Greis 2009, Cokkinos 2012, Pinto 2014, Miele 2016, Coccolini 2017, Stock 2017, Piccolo 2018, Sidhu 2018, Trinci 2019]. Die wesentliche Innovation im Ultraschall ist nicht eine verbesserte Gerätetechnik oder beschleunigte Untersuchungszeit, wie sie im selben Zeitraum die Tomographiegeräte erfahren haben, sondern die Einführung eines Kontrastverfahrens an sich.

Durch kontrastverstärkten Ultraschall (CEUS) lässt sich das Perfusionverhalten in Echtzeit beobachten. Von nun an kann sonographisch nicht nur durch den indirekten

Nachweis der freien Flüssigkeit auf eine relevante Abdominalverletzung geschlossen werden, sondern diese kann im Gegensatz zur alleinigen FAST lokalisiert werden. Hierdurch lässt sich die verbesserte Sensitivität erklären.

Wenn durch CEUS lebensbedrohliche Abdominalverletzungen bereits vor der Schnittbildgebung erkannt werden, können Therapieentscheidungen früher getroffen und Röntgenstrahlenexposition der Verletzten und des Personals reduziert werden [Dehqanzada 2015].

Damit CEUS in der Traumaversorgung zur breiteren Anwendung gelangt, müssen unterschiedlichste Fachrichtungen mit dem Verfahren vertraut werden. Die Ausbildung der Notfallsonographie ist somit interdisziplinär. Das Curriculum der DEGUM zur Notfallsonographie fordert heute bereits - im Gegensatz zu den Weiterbildungsordnungen - kontrastmittelsono graphische Ausbildungsinhalte [Arbeitskreis Notfallsonographie DEGUM].

Ausbildung zur klinischen Notfallsonographie ist praxisnah kaum umzusetzen: zu den bekannten Hinderungsgründen kommt hinzu, dass zum Zeitpunkt der praktischen Ausbildung schlichtweg keine Notfallpatienten zur Verfügung stehen.

Deswegen werden in der Ausbildung unterschiedlichste Simulationsverfahren genutzt. Neben der Untersuchungsübung an gesunden Probanden werden in Simulationsgeräte pathologische Befunde aus Patienten eingespielt, die dem Lernenden eine virtuelle Realität vorspielen. Dynamische Verfahren zur Perfusionsuntersuchung mittels farbkodierter Dopplersonographie oder kontrastverstärkter Ultraschall können bisher nicht zufriedenstellend dargestellt werden. Deswegen müssen für Ausbildungszwecke Modelle entwickelt werden, die die Dynamik des kontrastverstärkten Ultraschalls in Notfallsituationen simulieren.

Im hier etablierten Simulationsmodell zur kontrastverstärkten Ultraschalluntersuchung stumpfer und penetrierender Nierenverletzungen wurden achtzehn Kadavernieren aus Rehen oder aus Damwild innerhalb von 24 Stunden nach der Entnahme untersucht. Die Nieren wurden mit einer Heparinlösung gespült und in einem Wasserbad sonographiert. Die Nierenperfusion wurde durch eine Infusionslösung mit dem hinzugegebenen Ultraschallkontrastverstärker SonoVue® simuliert. Nach Darstellung der intakten Perfusion, wurden die Nierenorgane durch

eine Stichinzision, ein stumpfes Trauma oder eine Keilexzision verletzt. Die Verletzungen konnten in allen Fällen durch den Austritt einer Kontrastmittelfahne lokalisiert werden.

Als Nebenbefunde konnten Parenchyminfarkte - abhängig von der gewählten Heparindosis in der vorbereitenden Organspülung - beobachtet werden. Bei einer Dosis von 5000 IE unfraktionierten Heparins in 500 ml NaCl 0,9%igen-Spüllösung konnten regelhaft Infarktareale dargestellt werden. Wurde eine Dosis von 25000 IE unfraktionierten Heparins hinzugegeben, konnten bei den innerhalb von 24 Stunden durchgeführten Ultraschalluntersuchungen keine Infarkte nachgewiesen werden.

Weiterhin können durch das Modell die unterschiedlichen Kontrastierungsphasen des Nierenparenchyms simuliert und beobachtet werden. Die sonoanatomische Auflösung ist vor allem von der gewählten Kontrastmittelkonzentration abhängig. Wurden der Infusionslösung zur Perfusionssimulation 5 ml SonoVue® zugegeben, war der Bildeindruck der dargestellten Vaskularisation deutlich unschärfer und überzeichnet. Bei einer Dosiszugabe von 2,5 ml SonoVue® lassen sich dagegen einzelne Gefäße der Nierenrinde und des Nierenmarks abgrenzen und deren Perfusion darstellen.

Die Gesamtkosten des Modellaufbaus pro untersuchtem Organ für medizinische Einmalverbrauchsmaterialien belaufen sich abhängig von der verwendeten Kontrastmittelmenge auf 68 € bis 105 €. Da ein handelsübliches Ultraschallgerät verwendet wird, muss kein zusätzliches Simulationsgerät beschafft werden. Alle Aspekte der Gerätetechnik, Bildoptimierung und des Umgangs mit dem Kontrastmedium selber, können am im klinischen Alltag eingesetzten Ultraschallsystem erlernt und trainiert werden.

Durch die realitätsnahe Simulation der Befunde nach Organraumen lernen Notfallmediziner den kontrastverstärkten Ultraschall als Ergänzung oder Ersatz der FAST sowie als alternatives Bildgebungsverfahren in der Traumaversorgung von Kindern und Schwangeren kennen [Sidhu 2018, Schwarze 2020]. Auch wenn die Computertomographie überall dort wo sie zur Verfügung steht der Goldstandard in der Traumabildgebung bleibt, ist der kontrastverstärkte Ultraschall (CEUS) durch die hohe Gerätetmobilität und unkomplizierte Anwendung des Kontrastmediums die sensitivste Methode, wenn Ultraschall die einzige zur Verfügung stehende

Bildgebung ist. Klinische Beispiele hierfür sind Nachuntersuchungen am Patientenbett nach initial erfolgter Schnittbildgebung oder der Massenanfall von Verletzten.

Zukünftig werden auch in der Traumatologie durch kontrastverstärkten Ultraschall CT-Untersuchungen eingespart und Strahlenexpositionen weiter reduziert werden.

CEUS wird bereits in den oben genannten Indikationen angewandt. Die hohe Sensitivität und die günstigen Effekte des Verfahrens in der Traumaversorgung sind bereits belegt. Die breite Anwendung des kontrastverstärkten Ultraschalls in der Traumatologie wird zukünftig von der Güte der Ausbildung abhängen.

6. Literaturverzeichnis

1. Ali J, Rozycki GS, Campbell JP, Boulanger BR, Waddell JP, Gana TJ. Trauma ultrasound workshop improves physician detection of peritoneal and pericardial fluid. *J Surg Res.* 1996;63(1):275–9.
2. Arbeitskreis Notfallsonographie DEGUM. Antrag auf das DEGUM-Zertifikat des Arbeitskreises Notfallsonographie [Internet, letzter Zugriff 01.05.2020]: https://www.degum.de/fileadmin/dokumente/arbeitskreise/notfallsonographie/mehrstufenkonzept/NOT_Antragsformular_Zertifikat_08.01.2018 Änd. 2019-11-07.pdf
3. Armstrong LB, Mooney DP, Paltiel H, Barnewolt C, Dionigi B, Arbuthnot M, et al. Contrast enhanced ultrasound for the evaluation of blunt pediatric abdominal trauma. *J Pediatr Surg.* 2018;53(3):548–52.
4. Becker A, Lin G, McKenney MG, Marttos A, Schulman CI. Is the FAST exam reliable in severely injured patients? *Injury.* 2010;41(5):479–83.
5. Blehar DJ, Barton B, Gaspari RJ. Learning Curves in Emergency Ultrasound Education. *Acad Emerg Med.* 2015;22(5):574–82.
6. Bracco International. Fachinformation SonoVue® [Internet, letzter Zugriff 01.05.2020]: https://imaging.bracco.com/sites/braccoimaging.com/files/technica_sheet_pdf/de-de-2018-07-10-spc-sonovue.pdf.pdf
7. Brooks AJ, Price V, Simms M. FAST on operational military deployment. *Emerg Med J.* 2005;22(4):263–5.
8. Brown MA, Casola G, Sirlin CB, Patel NY, Hoyt DB. Blunt abdominal trauma: Screening US in 2,693 patients. *Radiology.* 2001;218(2):352–8.

9. Bundesärztekammer. Bundesärztekammer (Muster -) Weiterbildungsordnung 2018 [Internet, letzter Zugriff 01.05.2020]: https://www.bundesaerztekammer.de/fileadmin/user_upload/downloads/pdf-Ordner/Weiterbildung/20190920_MWBO-2018.pdf
10. Carter NJ, Gay D. FAST in the deployed military setting. *J R Army Med Corps*. 2018;164(5):332–4.
11. Catalano O, Aiani L, Barozzi L, Bokor D, De Marchi A, Faletti C, et al. CEUS in abdominal trauma: Multi-center study. *Abdom Imaging*. 2009;34(2):225–34.
12. Catalano O, Cusati B, Nunziata A, Siani A. Real-time, contrast-specific sonography imaging of acute splenic disorders: A pictorial review. *Emerg Radiol*. 2004;11(1):15–21.
13. Chung GKW, Gyllenhammer RG, Baker EL, Savitsky E. Effects of simulation-based practice on focused assessment with sonography for trauma (FAST) window identification, acquisition, and diagnosis. *Mil Med*. 2013 Oct;178(10 Suppl):87–97.
14. Clevert DA, Weckbach S, Minaifar N, Clevert DA, Stickel M, Reiser M. Contrast-enhanced ultrasound versus MS-CT in blunt abdominal trauma. *Clin Hemorheol Microcirc*. 2008;39(1–4):155–69.
15. Cocolini F, Montori G, Catena F, Kluger Y, Biffl W, Moore EE, et al. Splenic trauma: WSES classification and guidelines for adult and pediatric patients. *World J Emerg Surg*. 2017;12(1):1–26.
16. Damewood S, Jeanmonod D, Cadigan B. Comparison of a multimedia simulator to a human model for teaching FAST exam image interpretation and image acquisition. *Acad Emerg Med*. 2011;18(4):413–9.
17. Dammers D, El Moumni M, Hoogland II, Veeger N, ter Avest E. Should we perform a FAST exam in haemodynamically stable patients presenting after blunt

abdominal injury: A retrospective cohort study. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*. 2017;25(1):1–8.

18. Dehqanzada ZA, Meisinger Q, Doucet J, Smith A, Casola G, Coimbra R. Complete ultrasonography of trauma in screening blunt abdominal trauma patients is equivalent to computed tomographic scanning while reducing radiation exposure and cost. *J Trauma Acute Care Surg*. 2015;79(2):199–205.
19. Dietrich CF, Greis C. How to perform contrast enhanced ultrasound. *Dtsch Med Wochenschr*. 2016 Jul;141(14):1019–24.
20. Franke A, Bieler D, Friemert B, Kollig E, Flohe S. Preclinical and intrahospital management of mass casualties and terrorist incidents. *Chirurg*. 2017 Oct;88(10):830–40.
21. Friedrich-Loeffler-Institut 2020, Radar Bulletin. OpenAgrar Repository 2020. [Internet, letzter Zugriff 01.05.2020]: https://www.openagrар.de/servlets/solr/find?fq=category.top%3A%22mir_genres%3Aissue%22+AND+%28state%3Apublished+OR+createdby%3Aguest+%29&version=4.5&condQuery=Radar
22. Graham RNJ. Battlefield radiology. *Br J Radiol*. 2012;85(1020):1556–65.
23. Güsgen C, Franke A, Hentsch S, Kollig E, Schwab R. Das Terroranschlagtrauma – eine eigene Entität des Polytraumas: 10-Jahres-Update. *Chirurg*. 2017;88(10):821–9.
24. Healey MA, Simons RK, Winchell RJ, Gosink BB, Casola G, Steele JT, et al. A Prospective Evaluation of Abdominal Ultrasound in Blunt Trauma: Is It Useful? *J Trauma - Inj Infect Crit Care*. 1996;40(6):875–83.
25. Hertzberg BS, Kliewer MA, Bowie JD, Carroll BA, DeLong DH, Gray L, et al. Physician training requirements in sonography: how many cases are needed for competence? *AJR Am J Roentgenol*. 2000 May;174(5):1221–7.

26. Hofmann RR. Wildtiere in Bildern zur vergleichenden Anatomie. Hannover: Schaper; 2007.
27. Holtmann MH, Barreiros AP, Mudter J, Atreya R, Galle PR, Terkamp C, et al. Ultrasound education by simulator training--analysis of the largest simulator-based training in Germany. *Z Gastroenterol*. 2010 Nov;48(11):1279–84.
28. Hyvelin JM, Gaud E, Costa M, Helbert A, Bussat P, Bettinger T, et al. Characteristics and Echogenicity of Clinical Ultrasound Contrast Agents: An in Vitro and in Vivo Comparison Study. *J Ultrasound Med*. 2017;36(5):941–53.
29. Kratzer W, Pfeiffer M, Adler G. Medical education and continuing education of physicians in abdominal sonography at German universities. State of the art. *Internist (Berl)*. 2000 Jan;41(1):37–40.
30. Lee C, Balk D, Schafer J, Welwarth J, Hardin J, Yarza S, et al. Accuracy of Focused Assessment with Sonography for Trauma (FAST) in Disaster Settings: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Disaster Med Public Health Prep*. 2019;13(5–6):1059–64.
31. Lin Q, Lv F, Luo Y, Song Q, Xu Q, Su Y, et al. Contrast-enhanced ultrasound for evaluation of renal trauma during acute hemorrhagic shock: a canine model. *J Med Ultrason*. 2015;42(2):199–205.
32. Lin Q, Lv F, Luo Y, Song Q, Xu Q, Su Y, et al. Contrast-enhanced Ultrasound for Detection of Traumatic Splenic Bleeding in a Canine Model During Hemorrhagic Shock and Resuscitation. *J Med Ultrasound*. 2013;21(4):207–12.
33. Lobo V, Hunter-Behrend M, Cullinan E, Higbee R, Phillips C, Williams S, et al. Caudal Edge of the Liver in the Right Upper Quadrant (RUQ) View Is the Most Sensitive Area for Free Fluid on the FAST Exam. *West J Emerg Med*. 2017 Feb; 18(2):270–80.

34. Matsevych O, Koto M, Balabyeki M, Mashego L, Aldous C. Diagnostic laparoscopy or selective non-operative management for stable patients with penetrating abdominal trauma: What to choose? *J Minim Access Surg.* 2019;15(2):130–6.
35. Matthes G, Stengel D, Seifert J, Rademacher G, Mutze S, Ekkernkamp A. Blunt liver injuries in polytrauma: Results from a cohort study with the regular use of whole-body helical computed tomography. *World J Surg.* 2003;27(10):1124–30.
36. McGahan JP, Horton S, Gerscovich EO, Gillen M, Richards JR, Cronan MS, et al. Appearance of Solid Organ Injury with Contrast-Enhanced Sonography in Blunt Abdominal Trauma: Preliminary Experience. *Am J Roentgenol.* 2006 Sep;187(3):658–66.
37. McKenney MG, Martin L, Lentz K, Lopez C, Sleeman D, Aristide G, et al. 1,000 Consecutive Ultrasounds for Blunt Abdominal Trauma. *J Trauma - Inj Infect Crit Care.* 1996 Apr;40(4):607–12.
38. Menichini G, Sessa B, Trinci M, Galluzzo M, Miele V. Accuracy of contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in the identification and characterization of traumatic solid organ lesions in children: a retrospective comparison with baseline US and CE-MDCT. *Radiol Medica.* 2015;120(11):989–1001.
39. Miele V, Piccolo CL, Galluzzo M, Ianniello S, Sessa B, Trinci M. Contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in blunt abdominal trauma. *Br J Radiol.* 2016;89(1061).
40. Miele V, Piccolo CL, Sessa B, Trinci M, Galluzzo M. Comparison between MRI and CEUS in the follow-up of patients with blunt abdominal trauma managed conservatively. *Radiol Medica.* 2016;121(1):27–37.
41. Miller MT, Pasquale MD, Bromberg WJ, Wasser TE, Cox J. Not So Fast. 2003;54(1).

42. Montoya J, Stawicki SP, Evans DC, Bahner DP, Sparks S, Sharpe RP, et al. From FAST to E-FAST: an overview of the evolution of ultrasound-based traumatic injury assessment. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2016;42(2):119–26.
43. Naegeli M, Rehnus M. Rehkitzmarkierung: Gemeinsam zum Ziel. *Jagd Natur Das Schweizer Jagdmagazin.* 2015;(5):28–33.
44. Nolsøe CP, Lorentzen T. International guidelines for contrast-enhanced ultrasonography: ultrasound imaging in the new millennium. *Ultrasonography.* 2016 Apr 1;35(2):89–103.
45. Organ Recovery Systems. LifePort Kidney Transporter Operator's Manual 1.0 [Internet, letzter Zugriff 01.05.2020]: <https://4fetz713plu53drex2d10ht-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/12/755-00029-Rev-J-LKT100-Operators-Manual.pdf>
46. Østergaard ML, Ewertsen C, Konge L, Albrecht-Beste E, Bachmann Nielsen M. Simulation-Based Abdominal Ultrasound Training - A Systematic Review. *Ultraschall der Medizin.* 2016;37(3):253–61.
47. Osterwalder J, Mathis G, Hoffmann B. New Perspectives for Modern Trauma Management - Lessons Learned from 25 Years FAST and 15 Years E-FAST. *Ultraschall der Medizin.* 2019;40(5):560–83.
48. Piccolo CL, Trinci M, Pinto A, Brunese L, Miele V. Role of contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in the diagnosis and management of traumatic splenic injuries. *J Ultrasound.* 2018;21(4):315–27.
49. Pinto F, Miele V, Scaglione M, Pinto A. The use of contrast-enhanced ultrasound in blunt abdominal trauma: Advantages and limitations. *Acta radiol.* 2014;55(7):776–84.
50. Piscaglia F, Nolsøe C, Dietrich CF, Cosgrove DO, Gilja OH, Bachmann Nielsen M, et al. The EFSUMB guidelines and recommendations on the clinical practice of

contrast enhanced ultrasound (CEUS): Update 2011 on non-hepatic applications. *Ultraschall der Medizin.* 2012;33(1):33–59.

51. Putz FJ, Erlmeier A, Wiesinger I, Verloh N, Stroszczynski C, Banas B, et al. Contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in renal imaging at an interdisciplinary ultrasound centre: Possibilities of dynamic microvascularisation and perfusion. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2017;66(4):293–302.
52. Qi X, Tian J, Sun R, Zhang H, Han J, Jin H, et al. Focused assessment with sonography in trauma for assessment of injury in military settings: A meta-analysis. *Balkan Med J.* 2020;37(1):3–8.
53. Rajabzadeh Kanafi A, Giti M, Gharavi MH, Alizadeh A, Pourghorban R, Shekarchi B. Diagnostic Accuracy of Secondary Ultrasound Exam in Blunt Abdominal Trauma. *Iran J Radiol.* 2014 Jul 20;11(3):e21010.
54. Rehnus M, Arnold J, Elliger A, Reimoser F. Ear-marking of roe deer fawns (*Capreolus capreolus*): Results of long-term studies in Central Europe. *Beiträge zur Jagd- und Wildforsch.* 2018;43(December):71–90.
55. Richter C, Schwabe K, Grunert M, Friemert B. CEUS in gunshot wound of the liver – first experience in military mission. *Ultrasound Med Biol.* 2019 Aug 18;45(S 01):S64.
56. Ronald M. Stewart, Michael F. Rotondo, Sharon M. Henry MD. Advanced Trauma Life Support® Student Course Manual. 10th ed. Chicago; 2018.
57. Rowell SE, Barbosa RR, Holcomb JB, Fox EE, Barton CA, Schreiber MA, et al. The focused assessment with sonography in trauma (FAST) in hypotensive injured patients frequently fails to identify the need for laparotomy: A multiinstitutional pragmatic study. *Trauma Surg Acute Care Open.* 2019;4(1):11–6.
58. Rozycki GS, Shackford SR. Ultrasound, What Every Trauma Surgeon Should Know. *J Trauma Inj Infect Crit Care.* 1996 Jan;40(1):1–4.

59. Salen P, O'Connor R, Passarello B, Pancu D, Melanson S, Arcona S, et al. Fast education: A comparison of teaching models for trauma sonography. *J Emerg Med.* 2001;20(4):421–5.
60. Scalea TM, Rodriguez A, Chiu WC, Brenneman FD, Fallon WF, Kato K, et al. Focused Assessment with Sonography for Trauma (FAST). *J Trauma Inj Infect Crit Care.* 1999 Mar;46(3):466–72.
61. Schmiedl UP, Carter S, Martin RW, Eubank W, Winter T, Chang PP, et al. Sonographic detection of acute parenchymal injury in an experimental porcine model of renal hemorrhage: Gray-scale imaging using a sonographic contrast agent. *Am J Roentgenol.* 1999;173(5):1289–94.
62. Schneider M. SonoVue, a new ultrasound contrast agent. *Eur Radiol.* 1999;9 Suppl 3(3 SUPPL.):S347-8.
63. Schünke M, Schulte E, Schumacher U. PROMETHEUS Kopf, Hals und Neuroanatomie: LernAtlas Anatomie. Thieme; 2018.
64. Schwarze V, Marschner C, Negrão de Figueiredo G, Mueller-Peltzer K, Neumann J, Rübenthaler J, et al. SonoVue® Does Not Appear to Cross the Placenta as Observed During an Examination Aimed at Confirming a Diagnosis of Liver Echinococcosis in a Pregnant Woman. *Ultraschall der Medizin - Eur J Ultrasound.* 2020 Apr 7;41(02):146–7.
65. Schwarze V, Marschner C, Negrão de Figueiredo G, Rübenthaler J, Clevert D. Single-Center Study: Evaluating the Diagnostic Performance and Safety of Contrast-Enhanced Ultrasound (CEUS) in Pregnant Women to Assess Hepatic Lesions. *Ultraschall der Medizin - Eur J Ultrasound.* 2020 Feb;41(01):29–35.
66. Sessa B, Trinci M, Ianniello S, Menichini G, Galluzzo M, Miele V. Blunt abdominal trauma: role of contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in the detection and staging of

abdominal traumatic lesions compared to US and CE-MDCT. *Radiol Medica*. 2014;120(2):180–9.

67. Sidhu PS, Cantisani V, Dietrich CF, Gilja OH, Saftoiu A, Bartels E, et al. The EFSUMB guidelines and recommendations for the clinical practice of contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in Non-Hepatic Applications: Update 2017 (Long Version). *Ultraschall der Medizin*. 2018 Apr 6;39(2):e2–44.
68. Smith IM, Naumann DN, Marsden MER, Ballard M, Bowley DM. Scanning and war: Utility of FAST and CT in the assessment of battlefield abdominal trauma. *Ann Surg*. 2015;262(2):389–96.
69. Srinualnad N, Dixon AK. Right anterior subphrenic space: An important site for the early detection of intraperitoneal fluid on abdominal CT. *Abdom Imaging*. 1999;24(6):614–7.
70. Stenberg B, Talbot D, Khurram M, Kanwar A, Ray C, Mownah O, et al. A new technique for assessing renal transplant perfusion preoperatively using contrast-enhanced ultrasound (CEUS) and three-dimensional ultrasound (3DUS) - A porcine model pilot study. *Ultraschall der Medizin*. 2011;32(SUPPL. 2):8–13.
71. Stengel D, Bauwens K, Sehouli J, Porzsolt F, Rademacher G, Mutze S, et al. Systematic review and meta-analysis of emergency ultrasonography for blunt abdominal trauma. *Br J Surg*. 2001 Jul;88(7):901–12.
72. Stengel D, Bauwens K, Rademacher G, Mutze S, Ekkernkamp A. Association between compliance with methodological standards of diagnostic research and reported test accuracy: Meta-analysis of focused assessment of US for trauma. *Radiology*. 2005;236(1):102–11.
73. Stengel D, Rademacher G, Ekkernkamp A, Güthoff C, Mutze S. Emergency ultrasound-based algorithms for diagnosing blunt abdominal trauma. *Cochrane database Syst Rev*. 2015 Sep 14;2015(9):CD004446.

74. Stock K, Kübler H, Maurer T, Weiss D, Weskott H-P, Heemann U. Innovative Ultrasound: Contrast-Enhanced Ultrasound of the Kidneys. *Aktuelle Urol.* 2017 Apr; 48(2):120–6.
75. Störmann P, Gartner K, Wyen H, Lustenberger T, Marzi I, Wutzler S. Epidemiology and outcome of penetrating injuries in a Western European urban region. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2016;42(6):663–9.
76. Tagliati C, Argalia G, Polonara G, Giovagnoni A, Giuseppetti GM. Contrast-enhanced ultrasound in delayed splenic vascular injury and active extravasation diagnosis. *Radiol Medica.* 2019;124(3):170–5.
77. Terkamp C, Kirchner G, Wedemeyer J, Dettmer A, Kielstein J, Reindell H, et al. Simulation of abdomen sonography. Evaluation of a new ultrasound simulator. *Ultraschall der Medizin.* 2003;24(4):239–44.
78. Terkamp C, Walter B, Benter T, Hoffmann B, Kirchner G, Dettmer A, et al. Ultraschallausbildung am Ultraschallimulator. *Schweiz Rundsch Med Prax.* 2006 May 1;95(20):809–13.
79. Thorelius L. Contrast-enhanced ultrasound in trauma. *Eur Radiol Suppl.* 2004 Oct;14(S8):P43–52.
80. Tolsgaard MG, Todsen T, Sorensen JL, Ringsted C, Lorentzen T, Ottesen B, et al. International Multispecialty Consensus on How to Evaluate Ultrasound Competence: A Delphi Consensus Survey. *PLoS One.* 2013;8(2).
81. TraumaRegisterDGU®. Sektion Notfall- & Intensivmedizin & Schwerverletzenversorgung der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie e.V. AUC - Akademie der Unfallchirurgie GmbH [Internet, letzter Zugriff 01.05.2020]. 2019. Available from: http://www.traumaregister-dgu.de/fileadmin/user_upload/traumaregister-dgu.de/docs/Downloads/Jahresbericht_2019.pdf

82. Trinci M, Piccolo CL, Ferrari R, Galluzzo M, Ianniello S, Miele V. Contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in pediatric blunt abdominal trauma. *J Ultrasound*. 2019;22(1):27–40.
83. Valentino M, Ansaloni L, Catena F, Pavlica P, Pinna AD, Barozzi L. Contrast-enhanced ultrasonography in blunt abdominal trauma: considerations after 5 years of experience. *Radiol Medica*. 2009;114(7):1080–93.
84. Valentino M, De Luca C, Galloni SS, Branchini M, Modolon C, Pavlica P, et al. Contrast-enhanced US evaluation in patients with blunt abdominal trauma. *J Ultrasound*. 2010;13(1):22–7.
85. Yoshii H, Sato M, Yamamoto S, Motegi M, Okusawa S, Kitano M, et al. Usefulness and limitations of ultrasonography in the initial evaluation of blunt abdominal trauma. *J Trauma - Inj Infect Crit Care*. 1998;45(1):45–51.

7. Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Tabellen:

TBL. 1 EINZELVERBRAUCHSMATERIALLISTE FÜR DEN TRANSPORT UND ZUR PRÄPARATION	17
TBL. 2 EINZELVERBRAUCHSMATERIALLISTE ZUR KONTRASTVERSTÄRKten ULTRASCHALLUNTERSUCHUNG.....	20
TBL. 3 BASISDATEN DER ERLEGten TIERE; ERHOBEN BEIM AUFBRUCH	25
TBL. 4 ÜBERSICHT DER ULTRASCHALLBEFUNDE, TRAUMAART, KONTRASTVERSTÄRKER- UND HEPARINDOSIS SOWIE VERWENDETER ULTRASCHALLSONDEN UND -MODI.....	30
TBL. 5 B-BILDSONOGRAPHISCHE LÄNGSMESSUNG DER NIEREN IN CM	32
TBL. 6 NIERENGRÖÙE UND GEWICHT WEIBLICHER, AUSGEWACHSENER REHE	41

Abbildungen:

ABB. 1 PRÄPARATION DER NIERE	15
ABB. 2 SPÜLUNG DER NIERE	16
ABB. 3 SIMULATIONS AUFBAU ZUM ULTRASCHALL	19
ABB. 4 ANATOMIE DES REHS IN DORSALER AUFSICHT	23
ABB. 5 ANATOMIE DES REHS IN LINKS LATERALER ANSICHT	24
ABB. 6 ANZAHL DER ENTNOMMENEN, PRÄPARIERTEN UND KONTRASTVERSTÄKT SONOGRAPHIERTEN NIEREN	27
ABB. 7 B-BILDSONOGRAPHIE DER NIEREN	29
ABB. 8 B-BILDSONOGRAPHISCHE GRÖÙENMESSUNG	30
ABB. 9 VERTEILUNG DER SONOGRAPHISCH GEMESSENEN NIERENGRÖÙE ALLER TIERE	32
ABB. 10 VERTEILUNG DER SONOGRAPHISCH GEMESSENEN NIERENGRÖÙE WEIBLICHER, AUSGEWACHSENER REHE	33
ABB. 11 NIERENGRÖÙE IM VERHÄLTNIS ZUM GEWICHT AUSGEWACHSENER, WEIBLICHER REHE	34
ABB. 12 B-BILDSONOGRAPHIE: LUFTEMBOLIE.....	35
ABB. 13 B-BILDSONOGRAPHIE: NORMALBEFUND VS. LUFTEMBOLIE.....	36
ABB. 14 DARSTELLUNG EINER LUFTEMBOLIE IM KONTRASTMITTELMODUS.	37
ABB. 15 KONTRASTMITTELUNTERSUCHUNGEN NACH EINER LUFTEMBOLIE	38
ABB. 16 FARBKODIERTE DOPPLERSONOGRAPHIE (FKDS)	39
ABB. 17 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) NACH STICHVERLETZUNG.....	43
	94

ABB. 18 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) NACH STICHVERLETZUNG	44
ABB. 19 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) NACH STICHVERLETZUNG IN LÄNGSACHSE.....	45
ABB. 20 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) NACH STICHVERLETZUNG IN LÄNGS- UND QUERACHSE	45
ABB. 21 QUETSCHVERLETZUNG	46
ABB. 22 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) NACH QUETSCHUNG	46
ABB. 23 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) NACH KEILRESEKTION	47
ABB. 24 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) BEI GEFÄßVERLETZUNG DER A. RENALIS	49
ABB. 25 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) BEI GEFÄßVERLETZUNG DER A. RENALIS	50
ABB. 26 INFARKTNACHWEIS DURCH KONTRASTVERSTÄRKTEM ULTRASCHALL (CEUS).....	51
ABB. 27 INFARKTNACHWEIS DURCH KONTRASTVERSTÄRKTEM ULTRASCHALL (CEUS).....	51
ABB. 28 INFARKTNACHWEIS DURCH KONTRASTVERSTÄRKTEM ULTRASCHALL (CEUS).....	52
ABB. 29 INFARKTNACHWEIS DURCH KONTRASTVERSTÄRKTEM ULTRASCHALL (CEUS).....	53
ABB. 30 SONO-ANATOMIE DURCH KONTRASTVERSTÄRKTEM ULTRASCHALL (CEUS)	54
ABB. 31 SONO-ANATOMIE DURCH KONTRASTVERSTÄRKTEM ULTRASCHALL (CEUS)	55
ABB. 32 SONO-ANATOMIE DURCH KONTRASTVERSTÄRKTEM ULTRASCHALL (CEUS)	56
ABB. 33 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) DER RETROGRADEN VENÖSEN NIERENPERFUSION.....	57
ABB. 34 KONTRASTVERSTÄRKTER ULTRASCHALL (CEUS) DER RETROGRADEN VENÖSEN PERFUSION	58
ABB. 35 AUSWIRKUNGEN HOHER KONTRASTMITTELDOSIS UND - KONZENTRATION	60
ABB. 36 AUSWIRKUNG DES KONTRASTMITTELAUSTRITTS IN DAS WASSERBAD	61

8. Glossar der Jagdbegriffe

Aufbruch	Eingeweide und Entfernung derselben
Blattschuss	Treffersitz knapp hinter dem Schulterblatt
Bock	männliches Rehwild, älter als 1 Jahr
Bockkitz	männliches Rehwild, jünger als 1 Jahr
Decke	Fell
Geiß	weibliches Rehwild, älter als 1 Jahr
Jagdpacht	Jagdbezirk, in dem der Eigentümer das Jagdrecht besitzt
Kammer	Brustkorb
mit Haupt	Angabe zum Gewicht: das Tier wurde mit dem Haupt gewogen
Waidgerechtigkeit	fachgerechte Wildhege und Jagd
Wildhege	Maßnahmen zum Erhalt eines gesunden Wildbestandes

9. Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
Abb.	Abbildung
AIS	Abbreviated Injury Scale
ca.	circa
CE-CT	contrast-enhanced computertomography; kontrastverstärkte Computertomographie
CEUS	contrast-enhanced ultrasound; kontrastverstärkter Ultraschall
CT	Computertomographie
DEGUM	Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin
eFAST	extended Focussed assessment with Sonography for Trauma
FAST	Focussed Assessment with Sonography for Trauma
FKDS	farbkodierte Dopplersonographie
GCS	Glasgow Coma Scale score

h	Stunde
Hz	Hertz
IE	internationale Einheiten
ISS	injuries severity score
kg	Kilogramm
m	männlich
MAIS	Maximaler AIS (schwerste Verletzung)
mg	Milligramm
MHz	Megahertz
MI	mechanischer Index
ml	Milliliter
MW	Mittelwert
NaCl	Natriumchlorid
RTS	revised trauma score
Tab.	Tabelle
TraumaRegister DGU®	Traumaregister der deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie
UFH	unfraktioniertes Heparin
US	Ultraschall
V.	Vena
vs.	versus
Vv.	Venae
w	weiblich

10. Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus der elektronischen Version der Arbeit entfernt.

11. Danksagung

Mein Dank gilt all denjenigen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Insbesondere möchte ich Frau Prof. Dr. Pfister für die ausgezeichnete Betreuung und ihren ansteckenden Enthusiasmus für den kontrastverstärkten Ultraschall danken.

Ein großer Dank gilt auch den Jagdleuten Melanie und Philipp Roth, die sich rasch und anhaltend für meine Sache begeistern ließen. Der gleiche Dank gilt dem Jagdherrn Freiherrn Constantin von Ulm-Erbach.

Weiterhin möchte ich mich bei Frau Hanke für ihre Hilfe bei organisatorischen Dingen bedanken.