

3 Ergebnisse

3.1 Gewebeläsion in der hochfrequenzstrominduzierten interstitiellen Thermotherapie

Jede Applikation des hochfrequenten Stroms hatte eine uniforme Gewebeveränderung zur Folge. Das veränderte Lebergewebe und der Grenzbereich wurden makroskopisch und mikroskopisch untersucht und beurteilt.

3.1.1 Makroskopische Darstellung der Gewebeläsion

Nach der Stromapplikation wurde das Lebergewebe aufgeschnitten und der Applikator entfernt. Es zeigte sich ein gelblich gefärbter Bereich, der sich deutlich vom umgebenden Lebergewebe abgrenzte (Abbildung 12). Diese Gewebeveränderung wurde in gleicher Form nach jeder Messung ringsum den Applikator festgestellt.

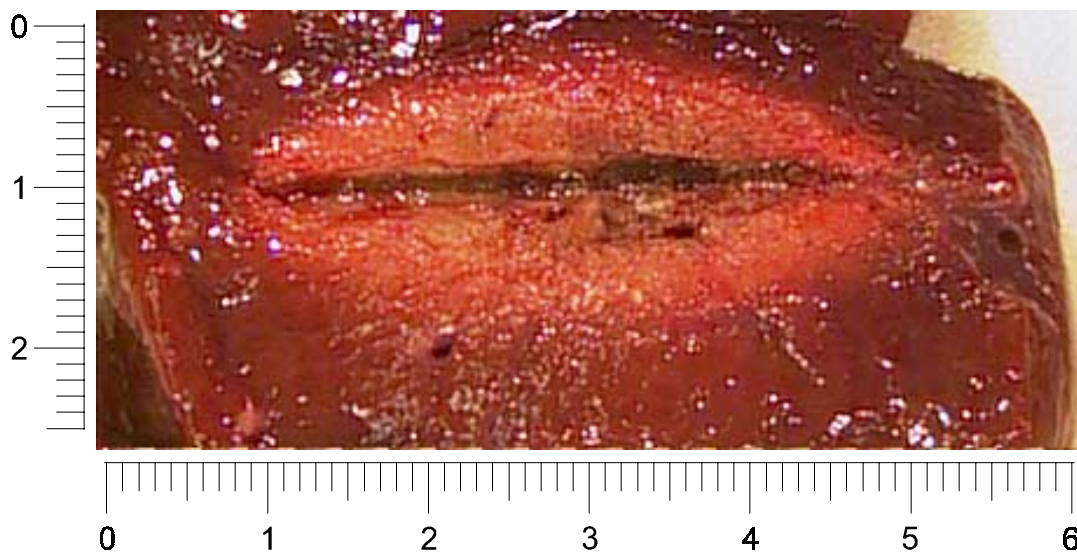


Abb. 12: Makroskopischer Schnitt durch das koagulierte Schweinelebergewebe in der Ebene des Stichkanals der 3 mm-HFITT-Nadel mit Zentimetermaß.

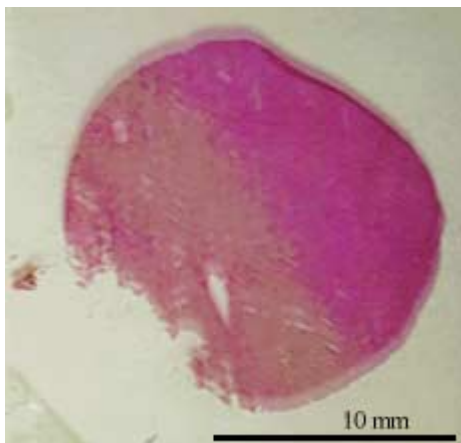
Die makroskopisch sichtbare Grenze koaguliertes/gesundes Lebergewebe wurde auch histologisch untersucht. Dazu wurden Paraffinschnitte und im Mikrotomkryostaten Gefrierschnitte angefertigt. Diese wurden einer Hämatoxylin-Eosin-(HE)-Färbung unterzogen, welche acido- und basophile Strukturen in biologischen Geweben darstellt. Damit lassen sich Gewebestrukturen mikroskopisch differenzieren. Um jedoch abzuschätzen zu können, ob scheinbar unge-

schädigte Zellbereiche noch volle Vitalität besitzen, wurde zusätzlich eine enzymhistochemische Färbung mit p-Nitrotetrazoliumblau (NTB-Färbung) durchgeführt.

Geschnittene und gestanzte Präparate, die mit Hämatoxylin-Eosin (HE) gefärbt wurden, zeigen im makroskopischen Erscheinungsbild keine signifikanten Unterschiede (Abbildung 13). Dadurch kann das Risiko mechanischer Veränderungen und damit Verfälschungen einer Probe durch die Schnitttechnik vernachlässigt werden. In beiden Präparaten zeigen sich ungeschädigte Gewebereiche tiefrot gefärbt, je größer die Schädigung des Gewebes, desto heller die Färbung. Man erkennt außerdem ein Ausfransen der Präparate, wo sich vorher die HF-Nadel befand.

Es wurden auch Schnitte angefärbt, die den Übergang von geschädigtem zu gesundem Lebergewebe in radialer und axialer Ebene darstellen sollten. Bei radialer Schnittführung wurde eine kreisförmige und bei axialer Schnittführung eine gradlinige Begrenzung der Koagulationszone erwartet. Diese Darstellung gelang mit p-Nitrotetrazoliumblau (Abbildung 14). Schon bei Betrachtung mit bloßem Auge fallen die unterschiedlich stark gekrümmten Grenzen der gefärbten Schnitte auf. Die blaue Zone zeigt gesundes Lebergewebe an, die ungefärbte Zone geschädigtes Lebergewebe.

a)



b)



Abb. 13: *Hämatoxylin-Eosin-(HE)-gefärbte Schnittpräparate des Grenzbereichs koaguliertes/gesundem Lebergewebe in axialer Schnittebene. Die Gewebeproben für den Mikrotomkryostaten wurden einmal gestanzt (a) und einmal geschnitten (b), um eventuelle Veränderungen des Gewebes durch manuelles Schneiden auszuschließen. Tatsächlich waren keine Unterschiede festzustellen. Man erkennt in beiden Schnitten einen tiefgefärbten Bereich, der in heller gefärbte Schichten übergeht. Augenfällig ist ein Ausfransen der Bereiche, welche jeweils der Nadel am nächsten lagen.*

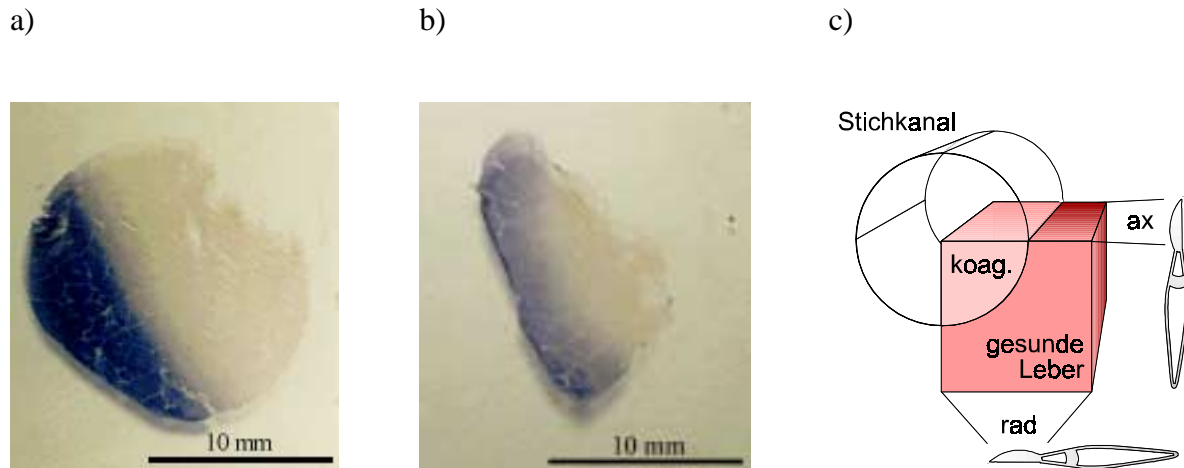


Abb. 14: *Histologische Schnittpräparate des Grenzbereichs koaguliertes/gesundes Lebergewebe in a) axialer und b) radialer Schnittebene, welche in c) schematisch dargestellt sind. Die Anfärbung erfolgte mit p-Nitrotetrazoliumblau, wobei die gefärbten Gewebestellen unversehrtes Lebergewebe anzeigen.*

3.1.2 Mikroskopische Darstellung der Gewebeläsion

Bei mikroskopischer Betrachtung der histologischen Schnittpräparate, die mit Hämatoxylin-Eosin (HE) angefärbt wurden, erkennt man deutliche Unterschiede. Abbildung 15 zeigt unversehrtes Schweinelebergewebe. Dieses wurde in ausreichendem Abstand zu dem durch HF-Strom geschädigten Bereich, entnommen. Man erkennt gesundes Parenchym rund um ein Periportalfeld mit Ästen der Leberarterie, Pfortader und des Gallengangsystems (Glisson Trias).

Abbildung 16 zeigt einen Ausschnitt eines durch HF-Strom geschädigten Schweinelebergewebes. Man erkennt hier folgende Auffälligkeiten:

- Die Leberkapillaren (Sinusoide) wurden stark erweitert.
- Das Periportalfeld wurde so stark deformiert, dass eine Differenzierung der Gefäße nicht mehr möglich ist.
- Die dunklere Färbung des Gewebes zeigt an, dass Schrumpfungen zu kompakteren Zellverbänden geführt haben. Dazwischen befinden sich Bereiche, in denen ganze Parenchymareale herausgelöst wurden.
- Die teilweise zerrissenen Strukturen weisen auf ein explosionsartiges Verdampfen der Zellflüssigkeit hin.

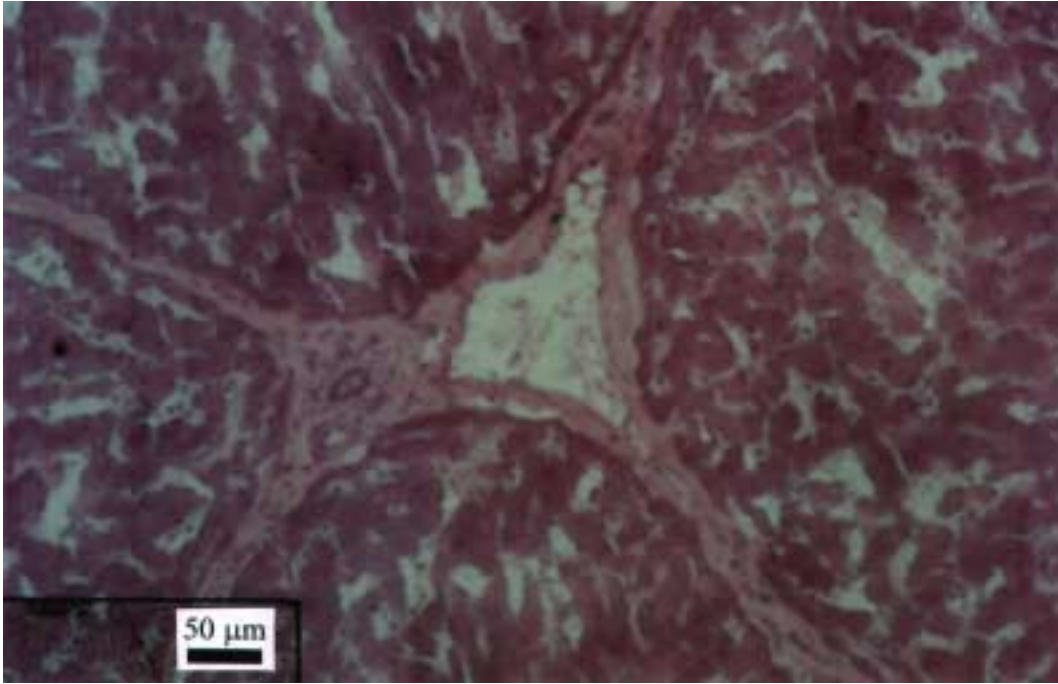


Abb. 15: Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit Hämatoxylin-Eosin angefärbten Lebergewebes. Es handelt sich um gesundes Schweinelebergewebe mit regulärem Parenchym rings um ein Periportalfeld.

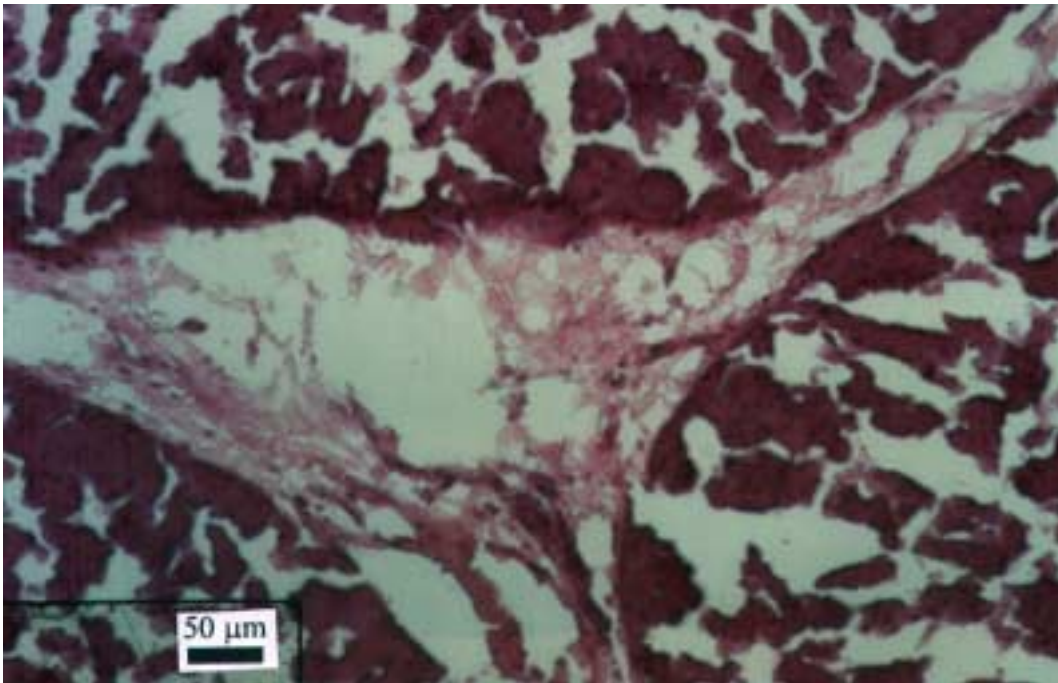


Abb. 16: Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit Hämatoxylin-Eosin angefärbten Gewebeschnitts. Der Ausschnitt zeigt ein durch HF-Strom geschädigtes Schweinelebergewebe. Das Periportalfeld wurde zerstört, die Sinusoide zeigen sich stark erweitert.

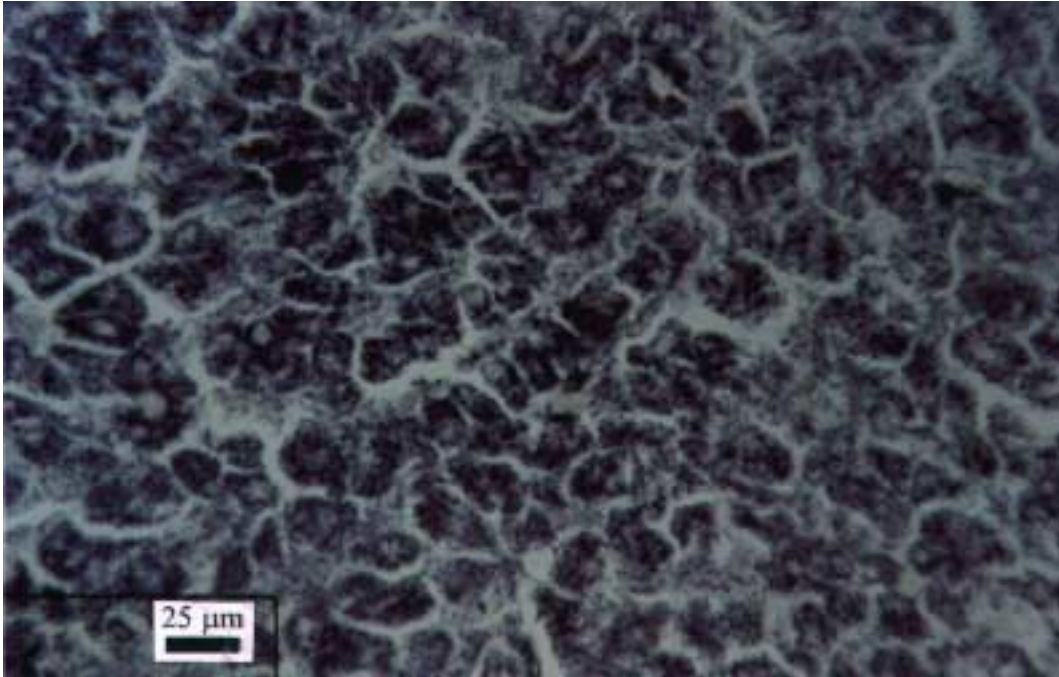


Abb. 17: Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit *p*-Nitrotetrazoliumblau gefärbten Schnittes aus gesundem Schweinelebergewebe. Die Unversehrtheit der Zellen wird durch die Blaufärbung angezeigt.

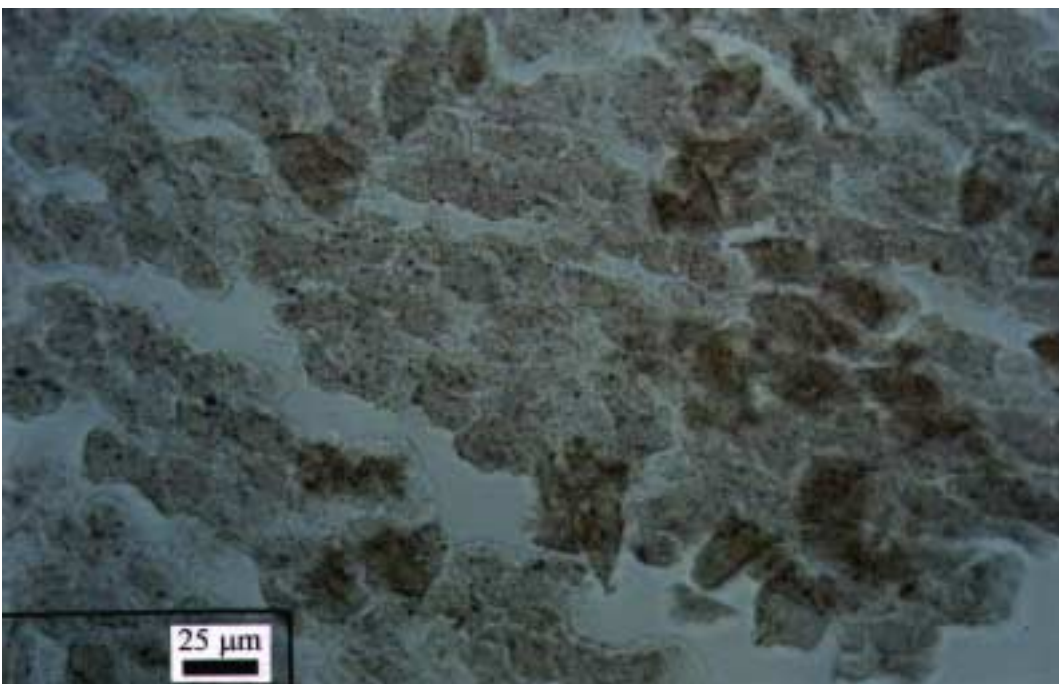


Abb. 18: Lichtmikroskopische Aufnahme eines *p*-Nitrotetrazoliumblau-Präparates eines mit HF-Strom behandelten Schweinelebergewebes. Das hitzgeschädigte Zellmaterial ist ungefärbt.

Bei den Hämatoxylin-Eosin-gefärbten Präparaten konnten also Veränderungen des Lebergewebes in geschädigten Zellbereichen vom ungeschädigten Gewebe unterschieden werden. Ein scharfer Grenzverlauf wurde aber nicht gefunden.

Die mit p-Nitrotetrazoliumblau gefärbten Schnittpräparate zum enzymhistochemischen Nachweis der Diaphorase zeigten unter dem Lichtmikroskop eine intensive Blaufärbung der gesunden Zellen (Abbildung 17). Mit derselben Färbemethode stellte sich hitzegeschädigtes Gewebe ungefärbt dar (Abbildung 18). Hier sind folgende Unterschiede zum gesunden Lebergewebe auszumachen:

- Die Destruktion des Gewebes ist so stark, dass Gewebeteile aus ihrem Verbund herausgelöst und übereinander gelagert wurden.
- Ein systematischer Gewebeaufbau ist nicht mehr zu erkennen.

In Abbildung 19 erkennt man bei geringerer Vergrößerung einen blau gefärbten Bereich, der an eine ungefärbte Zone grenzt. Diese Zone zeigt wie im blau gefärbten gesunden Gewebe reguläre Strukturen, die jedoch durch p-Nitrotetrazoliumblau nicht angefärbt wurden.

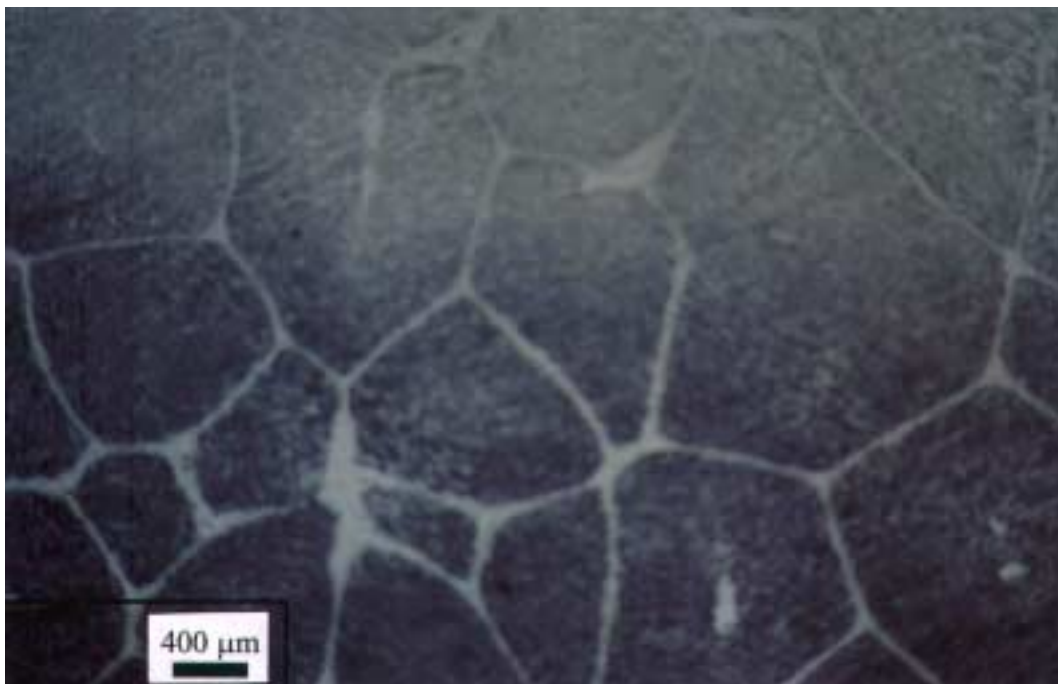


Abb. 19: Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit p-Nitrotetrazoliumblau gefärbten Präparates in geringerer Vergrößerung. Die durch HF-Strom geschädigten Areale im oberen Bildabschnitt ließen sich nicht färben. Bereiche gesunden Lebergewebes wurden durch Blaufärbung angezeigt. Die vielen Bindegewebssepten sind typisch für Schweinelebergewebe.

3.2 Hochfrequenzstrominduzierte interstitielle Thermotherapie in Schweineleber (Dosis-Wirkungs-Beziehung)

Um die beobachtete thermische Gewebeveränderung zu quantifizieren, wurde die Läsion freigelegt und die Koagulationszonen vermessen. Mit der Näherungsformel zur Berechnung des Volumens eines Rotationsellipsoids aus Kapitel 2.2.2.1 wurden die Koagulationsvolumina errechnet.

3.2.1 2 mm-HFITT-Applikator

Nach Platzierung der 2 mm-HF-Nadel in Schweineleber wurden für die Dauer von jeweils 10 Minuten Leistungen von 4 bis 9 Watt appliziert und mittlere Koagulationsvolumina von ungefähr 2300 bis 3200 mm³ erzielt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Mittlere Koagulationsvolumina mit statistischen Daten für die verschiedenen Generatorereinstellungen bei Anwendung der 2 mm-HFITT-Nadel. Die Applikationsdauer betrug 10 Minuten.

Eingestellte Generatorleistung	4 Watt	5 Watt	6 Watt	7 Watt	8 Watt	9 Watt
Mittelwert der Volumina in mm ³	2253	3241	4063	4384	3851	3171
Standardabweichung	299	221	836	1370	937	1472
Standardabweichung des Mittelwertes	113	99	341	433	296	466
F-Test für Volumen (p-Wert)		0,59	0,02	0,29	0,27	0,19

Da es bei allen Leistungseinstellungen oberhalb von 5 Watt ständig zu Leistungseinbrüchen vor Ende der 10minütigen Applikation kam, wurde beschlossen, die vollständig ausgeführten Messungen durch eine Grenze von denen mit vorzeitigen Abbrüchen des Koagulationsvorgangs zu kennzeichnen. Dieser Grenzwert ist in Abbildung 20 dargestellt.

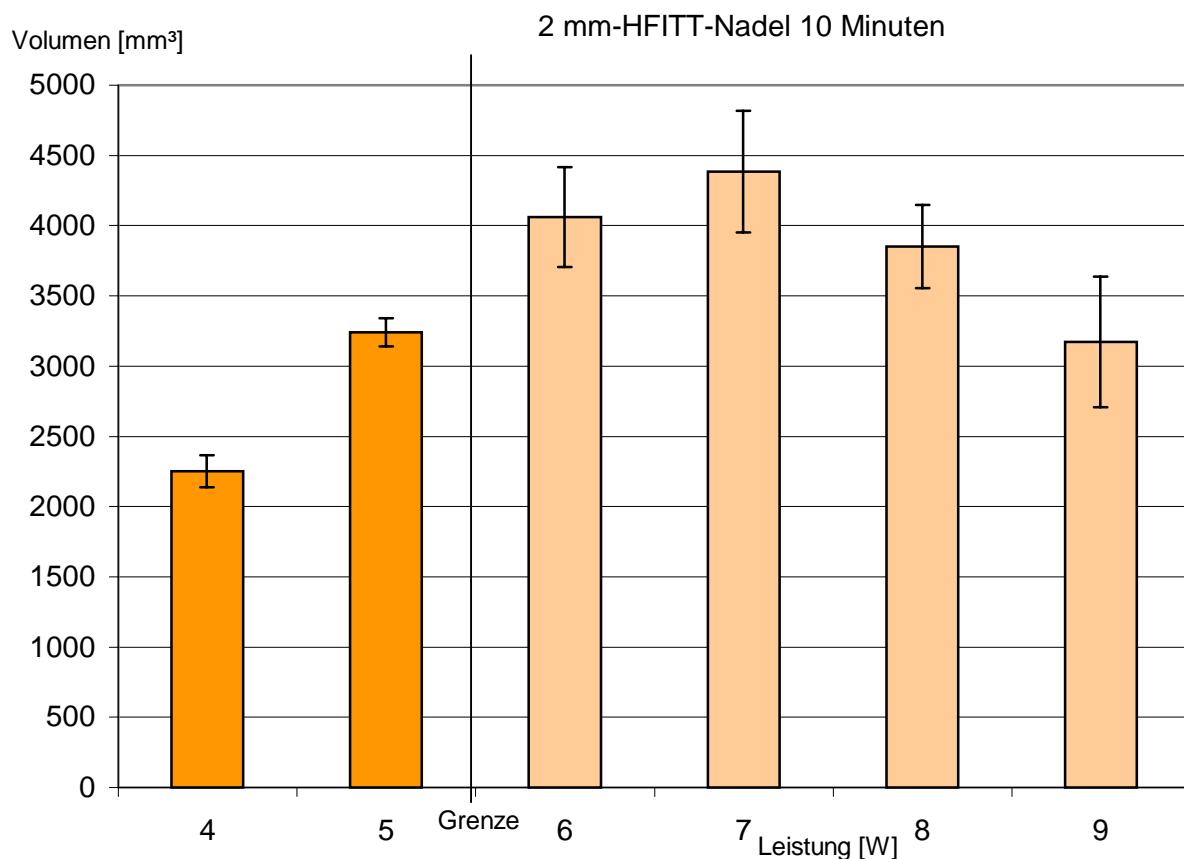


Abb. 20: *Abhängigkeit der mittleren Koagulationsvolumina einer 2 mm-HFITT-Nadel von der eingestellten Generatorleistung bei einer Applikationsdauer von 10 Minuten. Die Fehlerindikatoren zeigen die Standardabweichungen der Mittelwerte an. Es fällt auf, dass ab einem Grenzwert zwischen 5 und 6 Watt hohe Standardabweichungen auftreten.*

In Abbildung 21 wurden alle einzelnen Messergebnisse in Abhängigkeit von der Gesamtenergie verzeichnet. Mit Gesamtenergie wird die jeweilige Energiemenge bezeichnet, die während der gesamten Applikationsdauer in das Gewebe eingebracht wurde. Hier ist festzustellen, dass bei den Einstellungen über 5 Watt große Streuungen der Messwerte zu beobachten sind. Ähnlich große Volumina bei annähernd gleich großen Gesamtenergien erhielt man nur bei den niedrigen Einstellung 4 und 5 Watt.

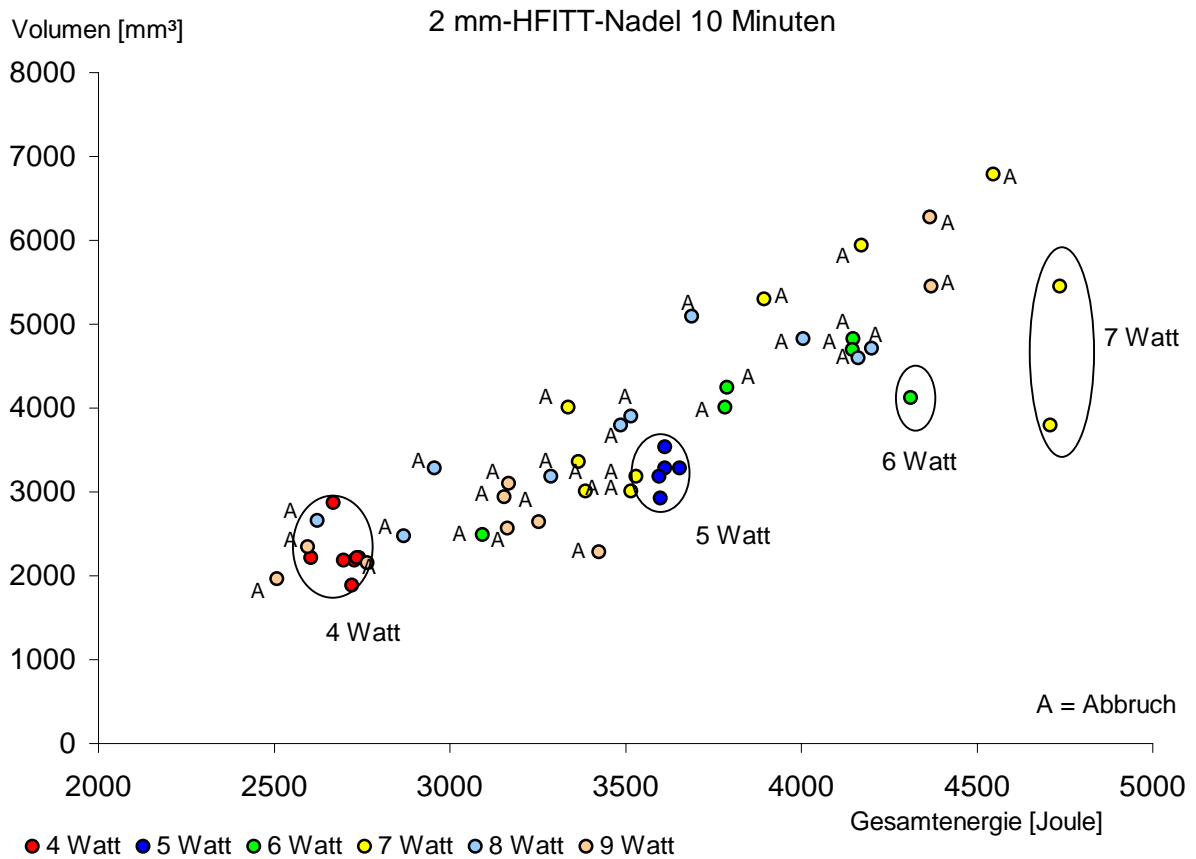


Abb. 21: Koagulationsvolumina in Relation zur Gesamtenergie bei den am Generator eingestellten Leistungsstufen von 4 – 9 Watt. Die Applikationszeit der 2 mm-HF-Nadel betrug 10 Minuten. Nur bei den eingekreisten Werten waren keine vorzeitigen Abbrüche des Koagulationsvorgangs zu verzeichnen.

Um eine Aussage über die Streuung der Einzelwerte machen zu können, wurde mit der Formel zur Berechnung des euklidischen Weges für jede Leistungseinstellung der Abstand jedes Messwertes zur Häufung berechnet (Tabelle 4).

Tabelle 5: Ergebnisse der Streuungsberechnung bei der 2 mm-HF-Nadel und einer Anwendungsdauer von 10 Minuten nach der Formel zur Berechnung des euklidischen Weges.

Leistung	4 Watt	5 Watt	6 Watt	7 Watt	8 Watt	9 Watt
Ergebnis der Berechnung	192	156	667	1331	906	1190

Die Werte geben den mittleren Abstand der Einzelergebnisse zur Häufung an. Auffällig ist die sprunghafte Vergrößerung des Abstandes ab einer Leistungseinstellung von 6 Watt. Bei 4 Watt und 5 Watt Leistungseinstellung sind die berechneten Abstände ähnlich gering, sodass damit der Grenzwert zwischen der Einstellung von 5 Watt und 6 Watt bestätigt werden konnte.

3.2.2 3 mm-HFITT-Applikator

Die Vorbereitung der Schweineleber, die Platzierung des Applikators und die Durchführung der Messungen wurden wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben vorgenommen. Um die optimalen Applikationsbedingungen für die 3 mm-HF-Nadel zu erhalten, wurden die Leistungen und die Applikationszeiten variiert.

3.2.2.1 Applikationsdauer 5 Minuten

Für eine vorgegebene Zeit von 5 Minuten wurden schrittweise um 1 Watt zunehmende Leistungsstufen, bei 9 Watt beginnend bis 13 Watt steigend, angewendet. Die Messungen der vom Generator abgegebenen Leistung erfolgte alle 2 Sekunden für die gesamte Dauer jeder einzelnen Applikation und zeigte regelmäßige Schwankungen. Für jede eingestellte Generatorleistung lag jedoch die tatsächliche Leistung ungefähr 2 Watt höher (Abbildung 22). Die Diskrepanz zwischen eingestellter und abgelesener Generatorleistung war gerätebedingt und wurde nicht weiter beachtet.

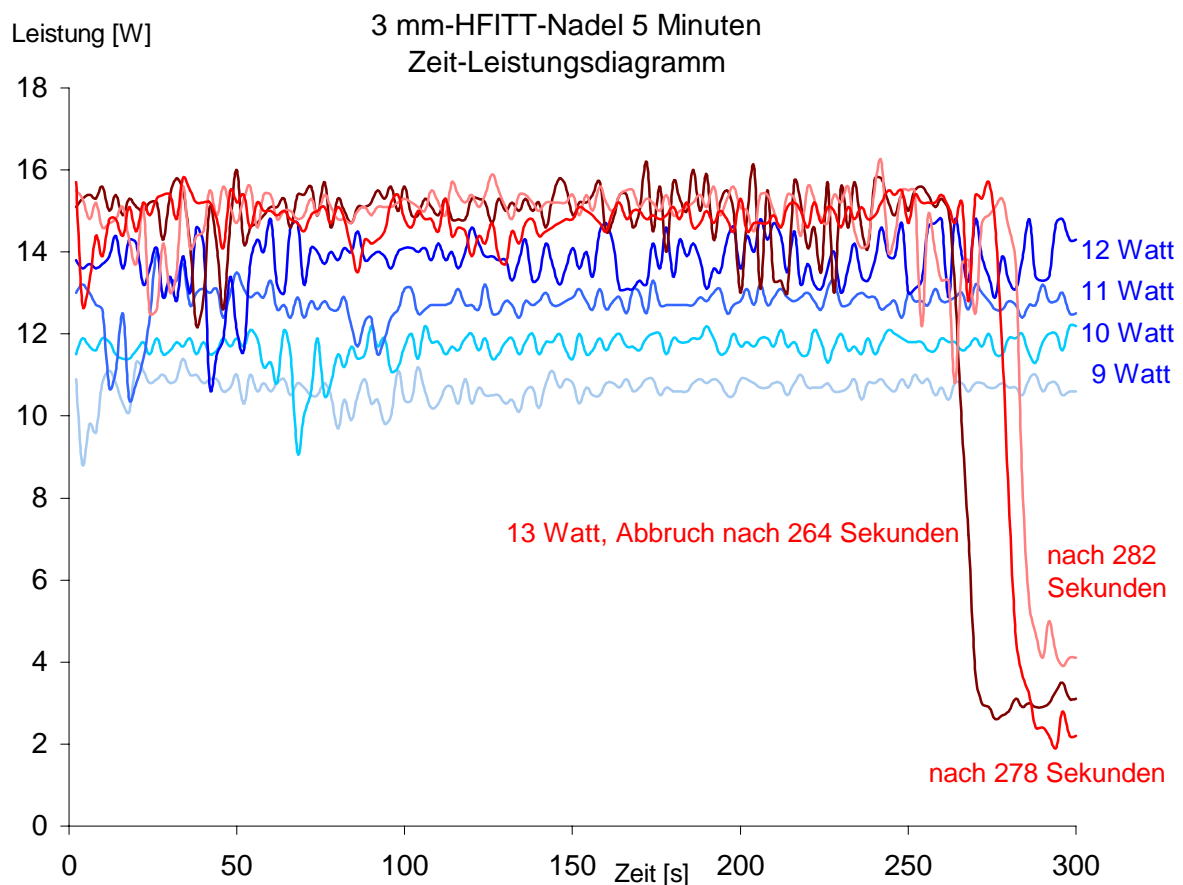


Abb. 22: Leistungen der Generatoreinstellungen “9 Watt – 13 Watt” in Abhängigkeit von der Zeit bei Einsatz der 3 mm-HFITT-Nadel. Die tatsächlichen Leistungen lagen dabei

um ungefähr 2 Watt höher als die am Generator angezeigten Werte. Das Abfallen der Leistung bei "13 Watt" zeigt das vorzeitige Ende des Leistungseintrags an. Bei den Einbrüchen sind jeweils die Zeiten der Leistungsminderung angegeben.

Die Abbildung 22 zeigt ein Zeit-Leistungsdiagramm. Zur Veranschaulichung wurde für jede Leistungsstufe, die keine Einbrüche zeigte, eine Leistungskurve in Abhängigkeit zur Zeit aufgetragen. Bei 13 Watt wurden Leistungseinbrüche vor Beendigung der Messung beobachtet. Hier wurden drei Leistungskurven aufgetragen, um die unterschiedlichen Zeitpunkte der Leistungsminimierung zu verdeutlichen. Auch der sprunghafte Abfall der zuvor hohen Leistung auf weitaus geringere Werte soll verdeutlicht werden. Die eingespeiste Leistung sinkt auf so niedrige Werte, dass der Wärmeeintrag und somit ein weiteres Anwachsen der Koagulation zu vernachlässigen ist.

Tabelle 6: Mittlere Koagulationsvolumina mit statistischen Daten für die verschiedenen Generatoreinstellungen bei Anwendung der 3 mm-HFITT-Nadel. Die Applikationsdauer betrug 5 Minuten.

Eingestellte Generatorleistung	9 Watt	10 Watt	11 Watt	12 Watt	13 Watt
Mittelwert der Volumina in mm ³	3903	4597	5150	5579	5982
Standardabweichung	233	245	267	366	336
Standardabweichung des Mittelwertes	60	58	63	92	106
F-Test für Volumen (p-Wert)		0,85	0,73	0,21	0,82
F-Test für Energie (p-Wert)		0,28	0,83	0,29	< 0,01

Die Mittelwerte der Koagulationsvolumina beim Einsatz der 3 mm-HF-Nadel bei einer Applikationsdauer von 5 Minuten, wie in Tabelle 6 ersichtlich, reichten von 3903 mm³ bei einer Generatorleistung von 9 Watt bis zu 5982 mm³ bei einer Leistung von 13 Watt.

Bei den durchgeführten Messungen ließen sich leichte Schwankungen sowohl in der applizierten Gesamtenergie als auch bei den erzielten Koagulationsvolumina feststellen.

Die Abbildung 23 zeigt alle Koagulationsvolumina in Relation zur Gesamtenergie bei den jeweils am Generator eingestellten Leistungsstufen. Bei 9 Watt eingestellter Generatorleistung betrug die Gesamtenergie ungefähr 3200 Joule. Mit steigender Generatorleistung nahm die applizierte Gesamtenergie zu. Bei eingestellter Leistung von 12 Watt nahm die Streuung der Gesamtenergie zu, lag im Mittel aber bei ungefähr 4150 Joule. Ab 13 Watt Generatorleistung zeichnete sich eine Häufung der Gesamtenergie bei einem Wert von 4500 Joule ab, sofern sich die Leistungseinspeisung über die gesamte Zeit ermöglichen ließ.

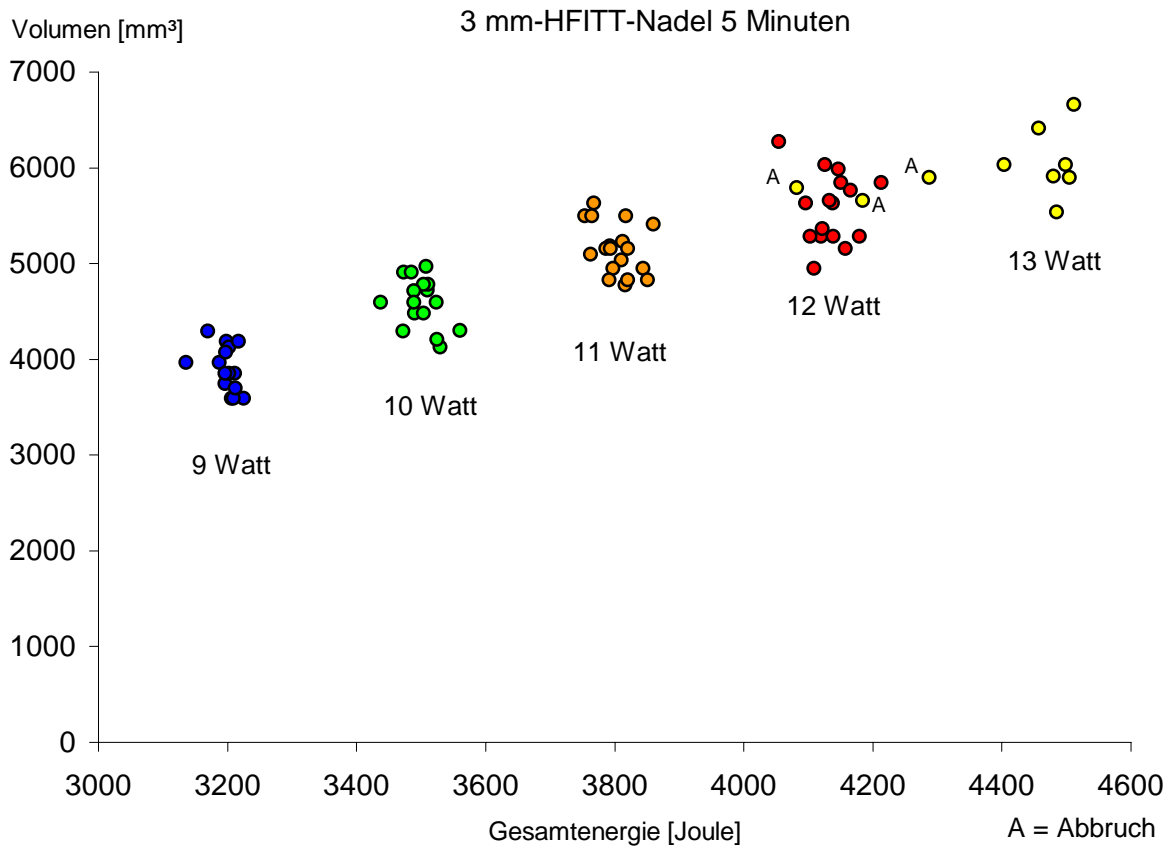


Abb. 23: Koagulationsvolumina in Relation zur Gesamtenergie bei den am Generator eingestellten Leistungsstufen von 9 – 13 Watt. Die Applikationszeit der 3 mm-HF-Nadel betrug 5 Minuten. Da bei einer Einstellung von 13 Watt die Applikationsdauer nicht für die gesamte Zeit eingehalten werden konnte, war die Reproduzierbarkeit der Messungen nur bei kleineren Leistungsstufen bis 12 Watt gewährleistet.

Auch hier wurde ein sprunghafter Leistungsabfall vor Ablauf der Applikationszeit und damit verbunden ein vorzeitiger Abbruch des Koagulationsvorganges beobachtet.

Stellt man nun die mittleren Koagulationsvolumina in Abhängigkeit von der eingestellten Generatorleistung wie in Abbildung 24 dar, so erkennt man einen linearen Anstieg der koagulierten Volumina mit steigender Leistung. Der Grenzwert für die Generatorleistung lag zwischen 12 und 13 Watt. Für die Einstellung von 13 Watt galt, dass einige Applikationen den Leistungseintrag für die gesamte Dauer von 5 Minuten zuließen und ein mittleres Koagulationsvolumen bestimmbar war. Der vorzeitige Leistungsabfall erfolgte relativ kurz, frühestens 34 Sekunden, vor Ende der Applikation, sodass das koagulierte Volumen gleich groß ausfiel wie die kleinsten Koagulationsvolumina bei vollständiger Messdauer. Diese Ergebnisse wurden im Balkendiagramm bei der eingestellten Leistung von 13 Watt mit einbezogen und wer-

den durch den Fehlerindikator, der bei 13 Watt größer als bei den übrigen Leistungsstufen ist, verdeutlicht. Einige Messungen wurden auch für 14 Watt eingestellter Generatorleistung vorgenommen und erwartungsgemäß wurden Leistungseinbrüche deutlich früher beobachtet. Die Reproduzierbarkeit war nicht gewährleistet, Mittelwerte wurden daher nicht berechnet.

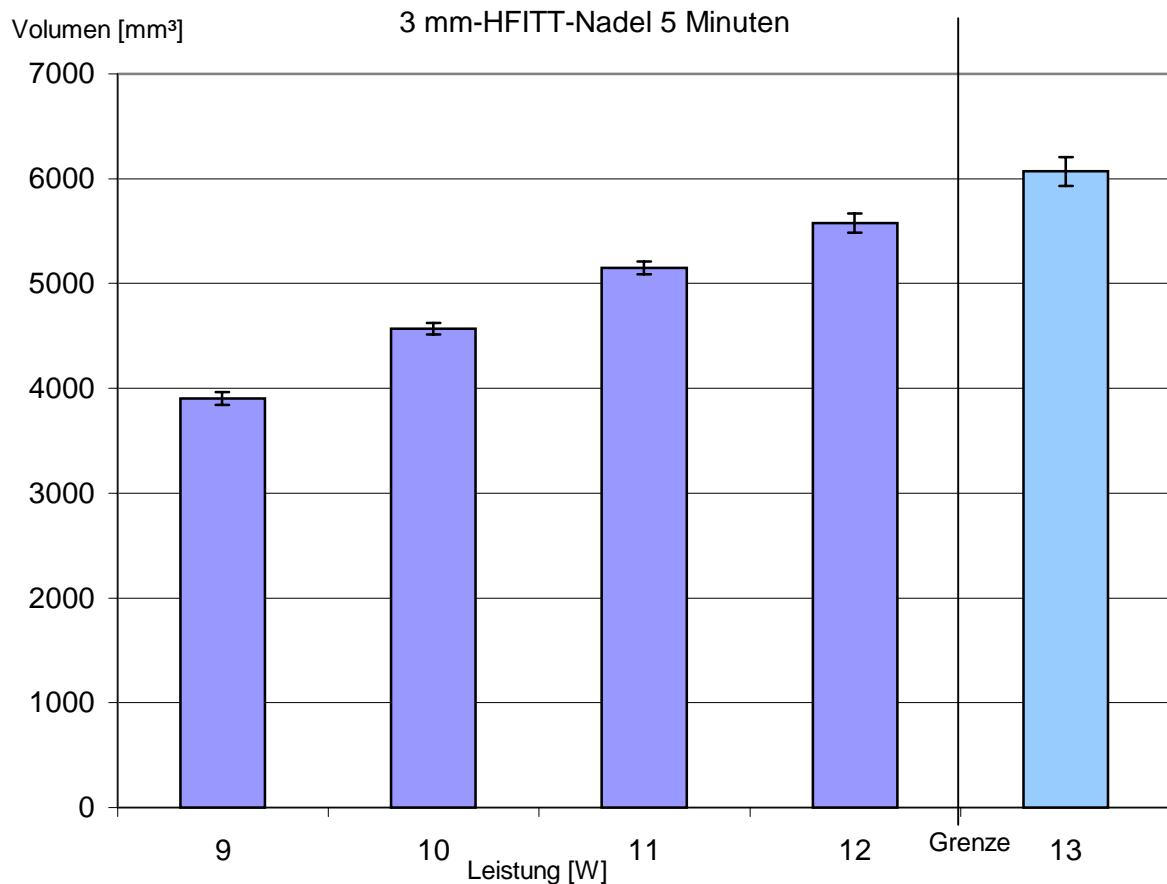


Abb. 24: *Abhängigkeit der mittleren Koagulationsvolumina einer 3 mm-HFITT-Nadel von der eingestellten Generatorleistung bei einer Applikationsdauer von 5 Minuten. Es zeigte sich ein linearer Anstieg der Volumina mit steigender Leistung. Ab einem Grenzwert zwischen 12 und 13 Watt erhielt man durch vorzeitige Abbrüche des Koagulationsvorgangs keine reproduzierbaren Werte mehr. Der Fehlerindikator zeigt jeweils die Standardabweichung des Mittelwertes.*

Man erkennt eine lineare Zunahme der mittleren Koagulationsvolumina mit steigender Generatorleistung, die Volumina stiegen hierbei pro Watt um ungefähr 500 mm³.

Auch hier führt die Beobachtung der Leistungseinbrüche bei einer Einstellung von 13 Watt zu einer Grenzwertfestlegung oberhalb von 12 Watt, da höhere Werte keine reproduzierbaren Ergebnisse lieferten.

3.2.2.2 Applikationsdauer 10 Minuten

Die 3 mm-HF-Nadel wurde bei einer Applikationsdauer von 10 Minuten eingesetzt und die Leistungsstufen erneut um 1 Watt ansteigend verändert.

Die während der Applikation alle 2 Sekunden erfolgten Leistungsmessungen zeigten auch dieses Mal einen Leistungsunterschied von 2 Watt zwischen der am Generator einstellbaren und der tatsächlichen Leistung. Für jede einzelne Applikation wurde eine Leistungskurve erstellt. Zur Verdeutlichung wurde jeweils eine Leistungskurve pro Leistungsstufe in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen und in der Abbildung 25 wiedergegeben. Die niedrigste Leistungsstufe begann bei 5 Watt eingestellter Generatorleistung und stieg kontinuierlich auf 10 Watt an. Bis 9 Watt konnte die eingespeiste Leistung über die gesamte Applikationszeit aufrecht erhalten werden. Bei 10 Watt Generatorleistung zeigten sich im Zeit-Leistungsdigramm vor Beendigung der vorgegebenen Applikationsdauer Leistungseinbrüche, die hier mit den jeweiligen Abbruchzeiten angegeben sind. Die Ausgangsleistung verringerte sich drastisch und der Koagulationsvorgang wurde abgebrochen.

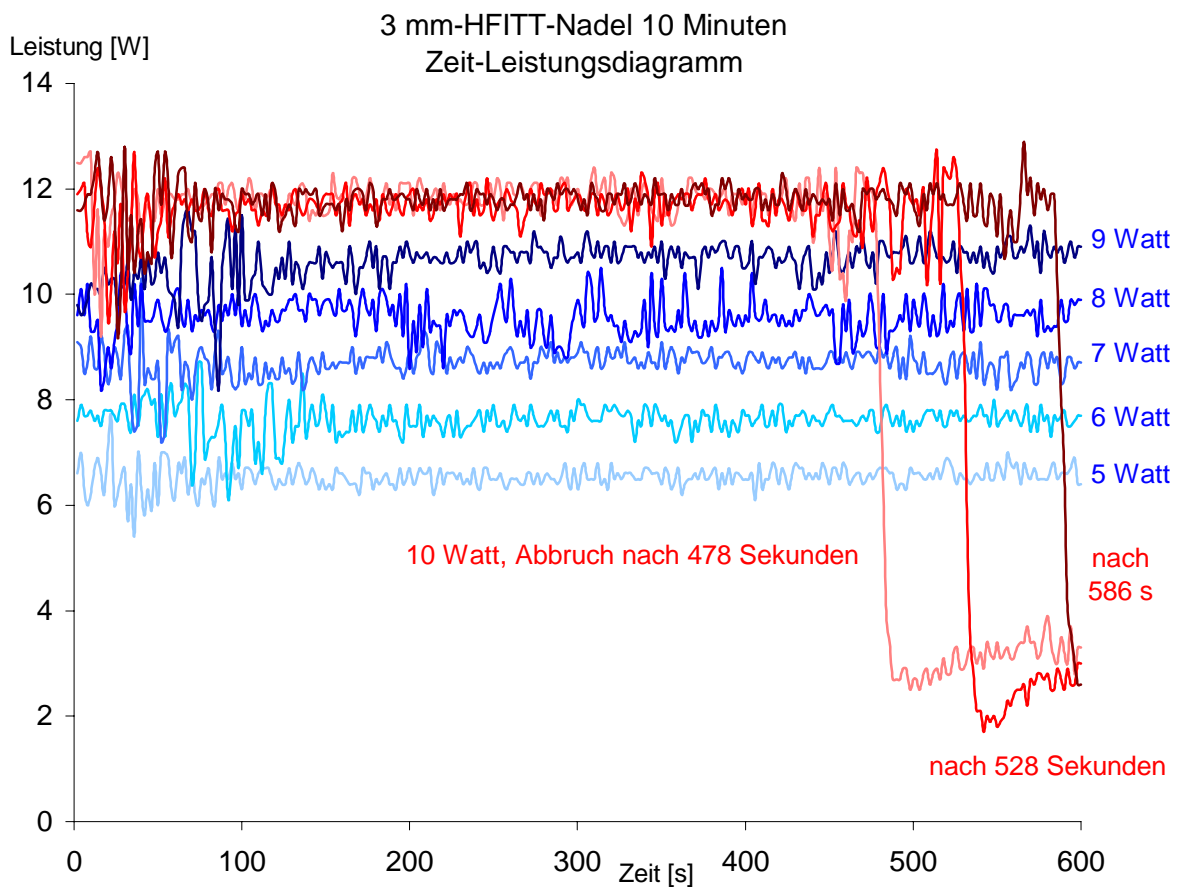


Abb. 25: Leistungen der Generatoreinstellungen "5 Watt – 10 Watt" in Abhängigkeit von der Zeit bei Einsatz der 3 mm-HFITT-Nadel. Die tatsächlichen Leistungen lagen dabei

um ungefähr 2 Watt höher als die am Generator angezeigten Werte. Das Abfallen der Leistung wurde bei "10 Watt" beobachtet. Die Zeiten der Leistungseinbrüche sind angegeben. Hier kam es zu Abbrüchen des Koagulationsvorgangs.

Dieser Vorgang entsprach den Beobachtungen bei der 2 mm-Nadel und auch bei 3 mm-Nadelstärke mit kürzerer Applikationszeit und höherer Leistungsstufe.

Die nach der Applikation ermittelten Koagulationsvolumina sind in Tabelle 7 zusammengestellt:

Tabelle 7: Mittlere Koagulationsvolumina mit statistischen Daten für die verschiedenen Generatoreinstellungen bei Anwendung der 3 mm-HFITT-Nadel. Die Applikationsdauer betrug 10 Minuten.

Eingestellte Generatorleistung	5 Watt	6 Watt	7 Watt	8 Watt	9 Watt	10 Watt
Mittelwert der Volumina in mm ³	2584	3299	4042	5113	6201	7409
Standardabweichung	166	141	307	230	179	500
Standardabweichung des Mittelwertes	68	58	116	94	68	189
F-Test für Volumen (p-Wert)		0,73	0,11	0,54	0,56	0,02

Die Koagulationsvolumina wuchsen von 2584 mm³ bei einer Generatoreinstellung von 5 Watt bis auf 7409 mm³ bei einer Leistung von 10 Watt an.

Auch hier wurden bei den Messergebnissen der jeweiligen Leistungsstufen Schwankungen in der applizierten Gesamtenergie und den erzielten Koagulationsvolumina bemerkt. Sie waren jedoch geringer als bei den bisherigen Messungen.

In grober Näherung stieg das Volumen pro Watt um 1000 mm³, nur bei den geringen Leistungsstufen von 5 Watt und 6 Watt war die Volumenzunahme etwas kleiner.

Von größerer Bedeutung für die Reproduzierbarkeit der Messungen war die Beziehung der Koagulationsvolumina zur eingebrachten Gesamtenergie für die jeweiligen eingestellten Leistungsstufen (Abbildung 26):

Von 5 Watt bis 9 Watt Generatorleistung nahm die Gesamtenergie um 500 bis 700 Joule pro eingestellter Leistung zu. Für die Leistungsstufe von 10 Watt konnte keine einheitliche Gesamtenergie festgestellt werden, da die vorzeitigen Leistungseinbrüche zu verschiedenen Zeitpunkten auch zu unterschiedlichen Gesamtenergiebeträgen führten. Die Applikationen bei eingestellter Leistung von 10 Watt ließen sich nicht reproduzieren.

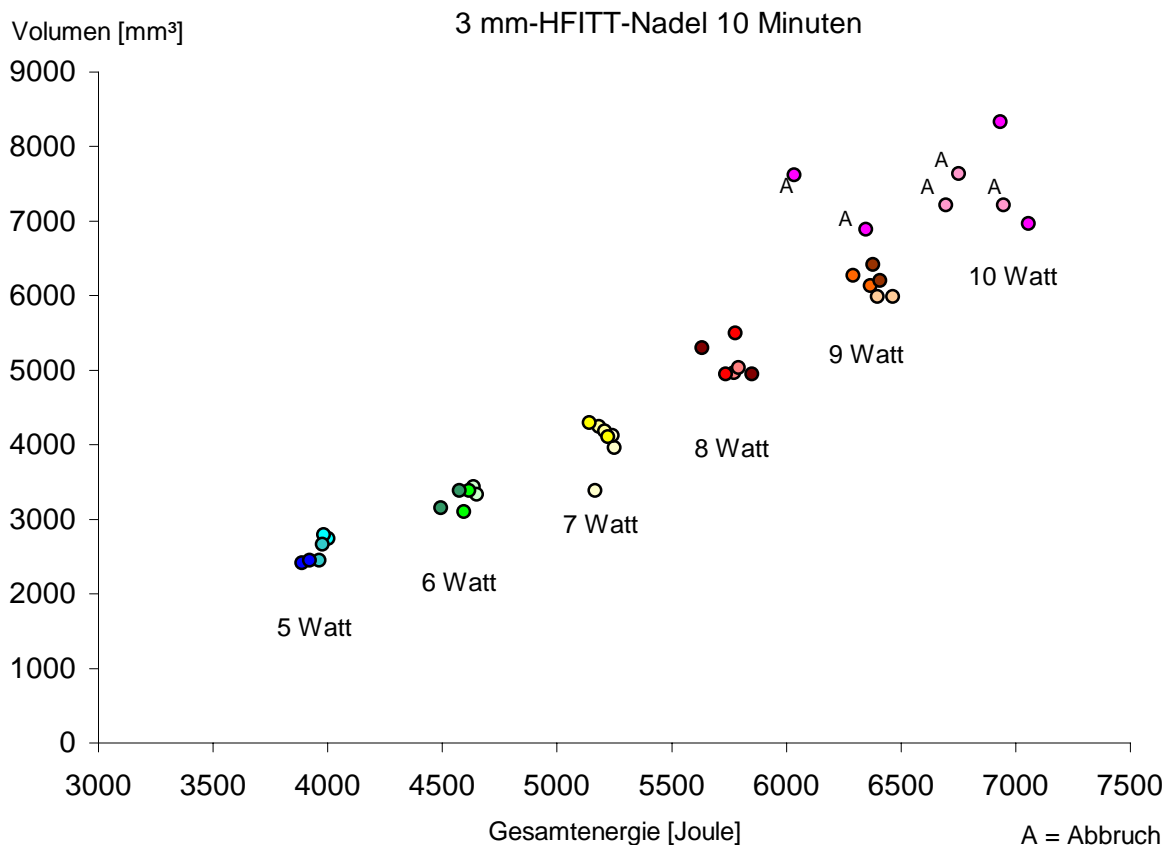


Abb. 26: Koagulationsvolumina in Relation zur Gesamtenergie bei den am Generator eingestellten Leistungsstufen von 5 – 10 Watt. Die Applikationszeit der 3 mm-HF-Nadel betrug 10 Minuten. Bei Leistungen ab 10 Watt waren vorzeitige Abbrüche des Koagulationsvorgangs zu beobachten.

Stellt man die mittleren Koagulationsvolumina in Abhängigkeit von der Generatorleistung dar, wie in Abbildung 27, so erkennt man einen linearen Anstieg der Volumina. Auch für die Leistungsstufe von 10 Watt lässt sich ein größeres mittleres Volumen feststellen. Auf Grund der zuvor gezeigten Leistungseinbrüche soll die Linie zwischen 9 Watt und 10 Watt eine Grenze für die Reproduzierbarkeit der Messungen deutlich hervorheben. Anhand der Standardabweichung des Mittelwertes, die hier für jeden Mittelwert als Fehlerindikator aufgetragen ist, wird die mangelnde Reproduzierbarkeit bei 10 Watt verdeutlicht.

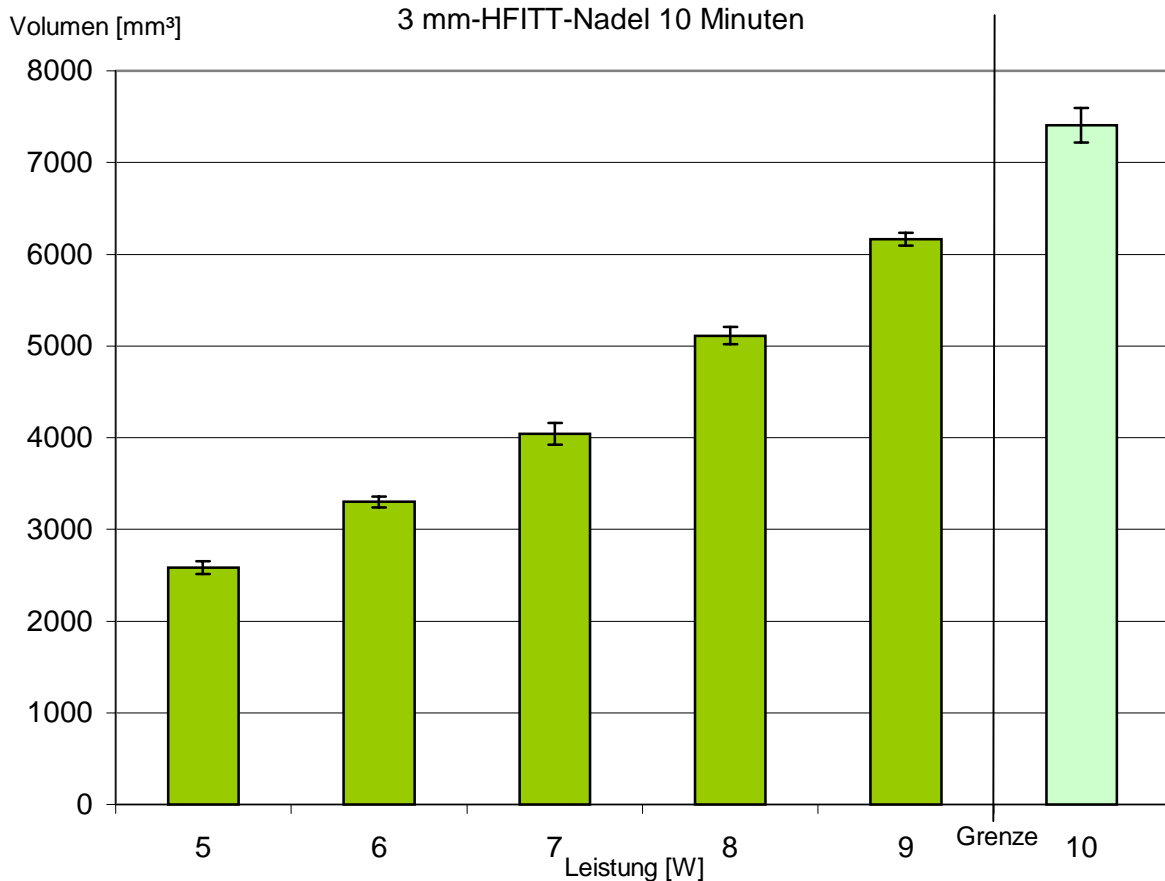


Abb. 27: *Abhängigkeit der mittleren Koagulationsvolumina einer 3 mm-HFITT-Nadel von der eingestellten Generatorleistung bei einer Applikationsdauer von 10 Minuten. Es zeigt sich ein linearer Anstieg der Volumina mit steigender Leistung. Ab einem Grenzwert zwischen 9 und 10 Watt erhielt man durch den vorzeitigen Abbruch des Koagulationsvorgangs keine reproduzierbaren Werte mehr. Der Fehlerindikator zeigt jeweils die Standardabweichung des Mittelwertes.*

Tabelle 8: Ergebnisse der Berechnung der Messwertstreuung bei der 3 mm-HF-Nadel und einer Anwendungsdauer von 10 Minuten nach der Formel zur Berechnung des euklidischen Weges.

Leistung	5 Watt	6 Watt	7 Watt	8 Watt	9 Watt	10 Watt
Ergebnis der Berechnung	151	129	215	200	157	515

Auch in Tabelle 8 ist ein sprunghafter Anstieg des mittleren Abstandes der Einzelwerte zum Cluster ab einer Leistungseinstellung von 10 Watt zu erkennen.

3.2.2.3 Zeitabhängigkeit der Koagulation

Bisher wurden für die 3 mm-HF-Nadel Messreihen zur Volumenbestimmung erstellt, bei denen die Applikationsdauer (von je 5 Minuten und je 10 Minuten) konstant war und jeweils die Leistungseinstellung verändert wurde. Um die vielfältige Abhängigkeit der Koagulationsvolumina von verschiedenen Parametern zu verdeutlichen, wurde nun bei vorgegebener Leistung die Applikationsdauer um jeweils eine Minute gesteigert. Die Messungen wurden bei den Leistungsstufen 9 Watt und 10 Watt über einen Zeitraum von 5 bis 10 Minuten durchgeführt. Die Abbildung 28 zeigt deutlich einen linearen Anstieg der erzielten Koagulationsvolumina in Abhängigkeit von der Applikationsdauer. Bei der höheren Leistungsstufe steigt das Volumen etwas steiler an. Die 9 und 10 Minuten-Werte der 10 Watt-Einstellung heben sich von den anderen ab, weil hier bei einigen Applikationen eine frühzeitige Beendigung der Leistungseinspeisung auftrat.

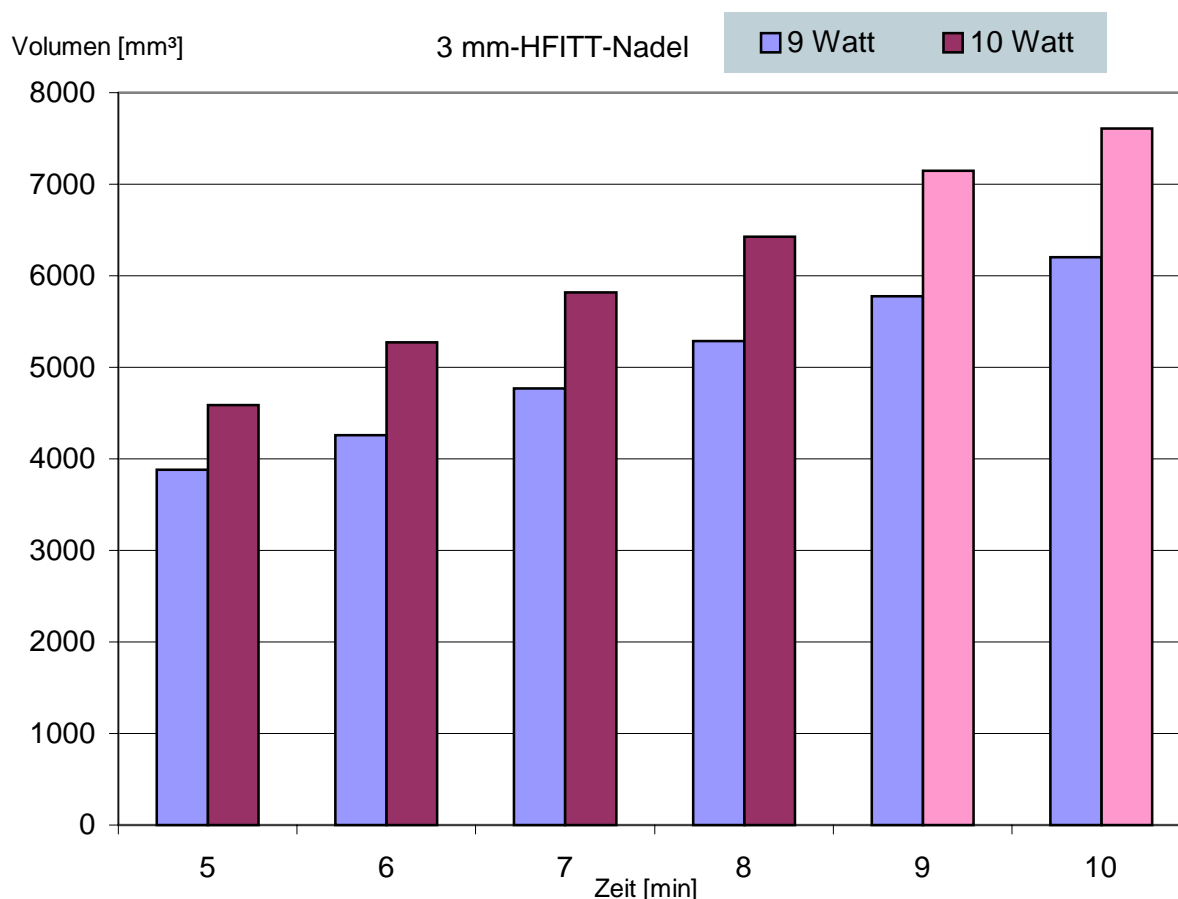


Abb. 28: Mittlere Koagulationsvolumina der 3 mm-HFITT-Nadel bei 9 und 10 Watt Generatorleistung und Applikationszeiten von 5 – 10 Minuten. Auch hier ist mit der Zeit ein linearer Anstieg der Volumina zu beobachten. Die 10 Watt-Einstellung bei 9 und 10 Minuten unterscheiden sich von den anderen Werten durch geringere Reproduzierbarkeit.

3.2.3 Modifizierter 3 mm-HFITT-Applikator

Zur Erzielung größerer Koagulationsvolumina wurden in ersten Vorversuchen Applikationen mit einer modifizierten HF-Nadel durchgeführt. Der veränderte Aufbau dieses Applikators ermöglichte die Kühlung der Elektroden. Sie wurden in einem geschlossenen System mit 23°C warmem Wasser gekühlt. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengetragen. Die Applikationsdauer betrug 10 Minuten, Leistung und Flussrate der Kühlflüssigkeit wurden variiert.

Tabelle 9: Übersicht der verschiedenen Applikationsparameter bei Einsatz eines gekühlten HF-Applikators mit 3 mm Durchmesser für die Dauer von 10 Minuten.

Leistung in Watt (W)	Zeit in Sekunden (s)	Kühlflussrate (ml/min)	Gesamtenergie in Joule	Volumen in mm ³
40	600	40	21500	27800
40	600	70	21500	25700
40	600	100	21500	25100
40	600	130	21500	27200
60	600	130	30500	24700
70	600	130	26300	23100

Durch die Kühlung konnten bei gleicher Zeit höhere Leistungen appliziert werden. Dadurch wurden ohne vorzeitige Reduzierung der Leistungseinspeisung, Koagulationsvolumina bis 27800 mm³ erzielt.