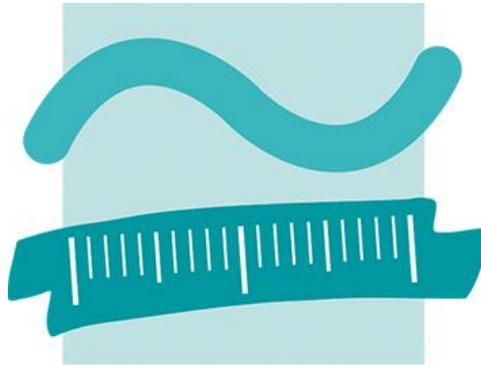


Beuth Hochschule für Technik Berlin
Fachbereich VIII
Veranstaltungstechnik und -management



BEUTH HOCHSCHULE
FÜR TECHNIK
BERLIN
University of Applied Sciences

Bachelorarbeit zum Thema:

**Untersuchungen zum Grenzlastverhalten von
Tiefton-Lautsprechern in Abhängigkeit von aktiver und
passiver Kühlung**

Zur Erlangung des Grades: Bachelor of Engineering

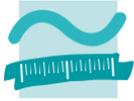
Vorgelegt von:

Maik Wegener
Wriezenerstraße 38
13359 Berlin
E-Mail: m.wegener@secretsounds.de

Matrikelnummer: 832032
Fachsemester: 10

Abgabedatum: 11.12.2020

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Alexander Lindau
Gutachter: Prof. Dipl.-Ing. Stephan Rolfes



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen und dem Internet) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht.

Die Bachelorarbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht physisch oder elektronisch veröffentlicht.

Berlin, den

.....

Vorwort

Alles begann vor zehn Jahren, als 2010 mein Vater meine Teenageraugen zum Leuchten brachte und wir gemeinsam seinen selbstentwickelten Verstärker zerlegten. Der mittlerweile Jahrzehnte alte Verstärker war mit 2x100 Watt Sinus und 15 kg schon lange nicht mehr zeitgemäß. Das kümmerte uns jedoch nicht und das bewusste Hören und Philosophieren über Audiotechnik wurde unsere neue Abendbeschäftigung. Etwa ein Jahr später begann ich meine derzeitigen und zukünftigen Ersparnisse in den Aufbau einer eigenen Audiotechnik zu investieren. Zügig vervielfachte sich mein Repertoire und auf die ersten Subwoofer, Topteile, Fullrangeboxen, Endstufen und Dsp's folgten weitere. Schon 2015 gründete ich gemeinsam mit meinem Freund und Kollegen Daniel unser Unternehmen „SecretSounds Veranstaltungstechnik“. Der Spezialisierung im Audiosegment treu geblieben, stattdessen wir heute mit unserem Soundsystem überwiegend Veranstaltungen im Club-, Paraden-, und Festivalbereich aus. Insbesondere die technischen Ausstattungen auf musikalisch unterstützten Demonstrationen, wie z.B. dem Zug der Liebe und dem Christopher Street Day stellen eine besondere Herausforderung dar – die Erzeugung von maximaler Leistung auf minimalem Raum. Die zur Verfügung stehende LKW-Ladefläche reicht nur selten aus, um hunderte Meter weit entferntes Publikum adäquat mit tiefen Frequenzen zu beschallen. Unter gewissen Umständen zeigte sich selbst eine passende Positionierung der Subwoofer in sogenannter „Endfired Array-Aufstellung“, als auch die Benutzung von Tiefton-Hochleistungslautsprechern in Kombination mit effizienten Subwoofer-Gehäusen als ungenügend. Persönliche Erfahrungen zeigen, dass insbesondere bei Musiksignalen mit verhältnismäßig hohen Effektivwerten an elektrischer Leistung über einen großen Zeitraum, trotz Verwendung komplexer Limiter, die Lautsprecher im Grenzlastbetrieb thermisch versagen. Die Untersuchung des thermischen Grenzlastverhaltens von Tiefton-Hochleistungslautsprechern in Abhängigkeit von aktiver und passiver Kühlung bietet mir daher die Möglichkeit, die oben beschriebenen Beschallungsaufgaben weiter zu optimieren. Insofern stellt das Thema dieser Bachelorarbeit sowohl ein wissenschaftliches als auch persönliches Interesse dar.

Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wird das thermische Grenzlastverhalten von Tiefton-Hochleistungslautsprechern in Abhängigkeit von aktiver und passiver Kühlung untersucht. Das Kernziel ist, herauszufinden, ob eine Wasserkühlung ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung von Tiefton-Hochleistungslautsprechern sein kann. Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage werden zwei zentrale Aspekte realisiert. Zum einen wird eine selbstentwickelte Wasserkühlung konstruiert und angefertigt. Hierbei liegt der Fokus auf einem effektiv gestalteten Funktionsprinzip bezogen auf die Wärmeableitung. Zum anderen wird eine Temperaturuntersuchung in Form eines Laborexperimentes durchgeführt. Diesbezüglich liegt der Schwerpunkt auf dem gesetzten Teilziel, den thermischen Einfluss der Signaldauer, des Crest-Faktors, der Belastung und der Wasserkühlung auf den zu untersuchenden Tiefton-Hochleistungslautsprecher zu ermitteln. Zudem wird die Hypothese bestätigt, dass überhaupt ein Optimierungsbedarf für die vorhandene passive Kühlung besteht. Auf Grundlage dessen wird die Forschungsfrage folgendermaßen beantwortet: Eine Wasserkühlung ist dann ein geeignetes Mittel zur Optimierung, wenn der Temperaturanstieg hoch, die Kühlung effizient, die Kühlwirkung groß und die resultierende Lautsprecherkerntemperatur gering ist. Denn dadurch lässt sich eine konstruktionsbedingte Effizienzsteigerung des Lautsprechers und eine Steigerung der thermischen Belastbarkeit realisieren. Wenn eines der genannten Einflussfaktoren nicht zutrifft, ist entweder eine Wasserkühlung überflüssig, oder es besteht die Gefahr einer thermischen Überlastung des Treibers.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Relevanz und Zielsetzung	1
1.2	Anforderungen an die Wasserkühlung.....	2
1.3	Lösungsidee für die Wasserkühlung.....	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Schlüsselbegriffe	4
2.1.1	Lautsprecher	4
2.1.2	Treiber.....	4
2.1.3	Beweglicher Spulentreiber	4
2.1.4	Scheitelwert und Effektivwert	4
2.1.5	Crest-Faktor	4
2.1.6	Powercompression.....	5
2.1.7	Power Handling.....	5
2.2	Power Handling des verwendeten Treibers	5
2.3	Aufbau beweglicher Spulentreiber.....	6
2.4	Berechnung der Schwingspulentemperatur	6
2.5	Temperaturkoeffizient von Kupfer.....	6
2.6	Berechnung der elektrischen Leistung.....	7
2.7	Herausforderung der Hochleistungslautsprecher.....	7
2.8	Gängige Kühlmechanismen	8
2.9	Positionierung der Wasserkühlung.....	9
3	Methodik	10
3.1	Wasserkühlung	10
3.1.1	Verwendetes Material.....	10
3.1.2	Allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise.....	10
3.1.3	3D-Entwurf	11
3.1.4	Funktionsschema	13
3.1.5	Fertigungsablauf	14

3.2	Temperaturuntersuchung	15
3.2.1	Verwendetes Material.....	15
3.2.2	Allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise.....	15
3.2.3	Ein- und Ausschlusskriterien der erhobenen Daten	16
3.2.4	Messbedingungen.....	17
3.2.5	Durchführung	17
3.2.6	Belastungen	19
3.2.7	Signal.....	19
3.2.8	Schematischer Messaufbau	20
3.2.9	Erläuterung der Variablen	21
4	Ergebnisse	27
4.1	Wasserkühlung	27
4.2	Temperaturuntersuchung	28
4.2.1	Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramme.....	28
4.2.2	Vergleich Temperaturverlauf-Diagramme.....	38
4.2.3	Extrema-Kennwerte.....	41
5	Diskussion.....	45
5.1	Zusammenhang der Einflussfaktoren	45
5.2	Bestätigung der Hypothese	47
5.3	Der Temperaturanstieg als wesentliches Optimierungskriterium	47
5.4	Die Effizienz der passiven und aktiven Kühlung	48
5.5	Teilziel eines effektiv gestalteten Funktionsprinzips.....	48
5.6	Die Powercompression anders als erwartet	49
6	Fazit	52
	Quellenverzeichnis	55
	Abbildungsverzeichnis.....	57
	Tabellenverzeichnis.....	58
	Anhang.....	59

1 Einleitung

1.1 Relevanz und Zielsetzung

Die Entwicklung moderner Beschallungsanlagen schreitet rasant voran und es ist festzustellen, dass insbesondere Tiefton-Lautsprecher immer höheren, sowohl mechanischen als auch elektrischen Belastungen gewachsen sind. So haben sich die Leistungsangaben in den letzten Jahrzehnten mehr als verdreifacht (vgl. Martin Audio Ltd., 1980 S. 2 und Martin Audio Ltd., 2020 S. 28). Zeitgleich wächst der für den Lautsprecher zu bewältigende Hitzeanstieg, die konstruktive Herausforderung und die Relevanz des Kühlsystems. Insbesondere gewisse Genres im elektronischen Bereich, wie z.B. Techno, Drum and Bass und Goa, besitzen teilweise einen überdurchschnittlich hohen Energiegehalt bzw. Crest-Faktor. Ein großer Anteil dieser Energie wird im Lautsprecher in Wärme umgewandelt. Die thermische Belastung kann zur Zerstörung der Schwingspule und somit zum Versagen des Lautsprechers führen. Bestenfalls muss nur der Treiber im Lautsprecher ersetzt werden, schlimmstenfalls kann die komplette Veranstaltung gefährdet sein. Zudem haben persönliche Erfahrungen gezeigt, dass Tiefton-Hochleistungslautsprecher trotz Orientierung an den maximalen Belastbarkeitsangaben der Hersteller thermisch versagen können. Hinzukommend sorgt eine hohe Schwingspulentemperatur für einen großen Schwingspulentemperaturhub, was einen konstruktionsbedingten negativen Einfluss auf die Effizienz des Lautsprechers zufolge hat (Borwick, 2001, S. 74-77).

In dieser Bachelorarbeit wird mithilfe eines speziell für die Untersuchung selbstentwickelten Lautsprecher-Fluidkühlsystems herausgearbeitet, ob eine Wasserkühlung ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung von Tiefton-Hochleistungslautsprechern sein kann.

Die Beantwortung dieser Forschungsfrage soll mittels folgender Teilaspekte realisiert werden. Ein Teilziel dieser Ausarbeitung ist eine erfolgreiche Entwicklung, Konstruktion und Fertigung der Wasserkühlung mit einem effektiv gestalteten Funktionsprinzip bezogen auf die Wärmeableitung. Das bedeutet, den zu erwartenden Anstieg der Schwingspulentemperatur im Grenzlastbereich auf ein Minimum von $\Delta T_{Schwing} \leq 50^\circ\text{C}$ zu reduzieren. Ein weiteres Teilziel ist, den thermischen Einfluss der Signaldauer, des Crest-Faktors, der Belastung und der Wasserkühlung auf den zu untersuchenden Tiefton-Hochleistungslautsprecher zu ermitteln. Zudem soll die Hypothese bestätigt werden, dass überhaupt ein Optimierungsbedarf für die vorhandene passive Kühlung besteht. Für die Erarbeitung dieser Teilaspekte ist es notwendig, einen funktionstüchtigen Messaufbau anzufertigen und alle wesentlichen Messgrößen mithilfe von Temperaturuntersuchungen erfolgreich zu ermitteln. Infolgedessen sollen die Messwerte in aussagekräftigen Diagrammen veranschaulicht und analysiert werden. Eine Beurteilung der Extremwerte und der Vergleich zwischen Aktiv- und Passivkühlung soll Auskunft über die Optimierung geben. Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse können optional weitere, eventuell aufkommende themarelevante Rückschlüsse und Auswirkungen beleuchtet werden.

1.2 Anforderungen an die Wasserkühlung

Zur Klärung der Aufgabenstellung wurden stichpunktartig mittels Mindmap die Anforderungen an die Wasserkühlung aufgestellt und in Fest- und Wunschforderungen unterteilt. Abbildung 1 zeigt die Festforderungen und Abbildung 2 zeigt die Wunschforderungen.



Abbildung 1: Mindmap mit den Festforderungen an die Wasserkühlung [Eigene Darstellung].



Abbildung 2: Mindmap mit den Wunschforderungen an die Wasserkühlung [Eigene Darstellung].

1.3 Lösungsidee für die Wasserkühlung

Im Laufe der Entwicklung sind eine Vielzahl von Lösungsideen entstanden. Um den Ausarbeitungsumfang einzuhalten, wird lediglich auf die umzusetzende Idee eingegangen. Die folgende Abbildung 3 stellt das schematische Funktionsprinzip dar.

Erklärung: Das kalte Wasser gelangt durch den Wasserzulauf zwischen dem Polkern und dem Chassis. Es besteht also direkter Kontakt zum Polkern. Im weiteren Prozess fließt das Wasser zum gegenüberliegenden Wasserablauf. Auf dem Weg dorthin entzieht es dem Polkern seine thermische Energie. Im Anschluss fließt das nun erwärmte Wasser durch den Wasserablauf und verlässt das System. Sowohl oben als auch unten kommt eine Dichtung zum Einsatz, um einen unerwünschten Wasseraustritt zu verhindern.

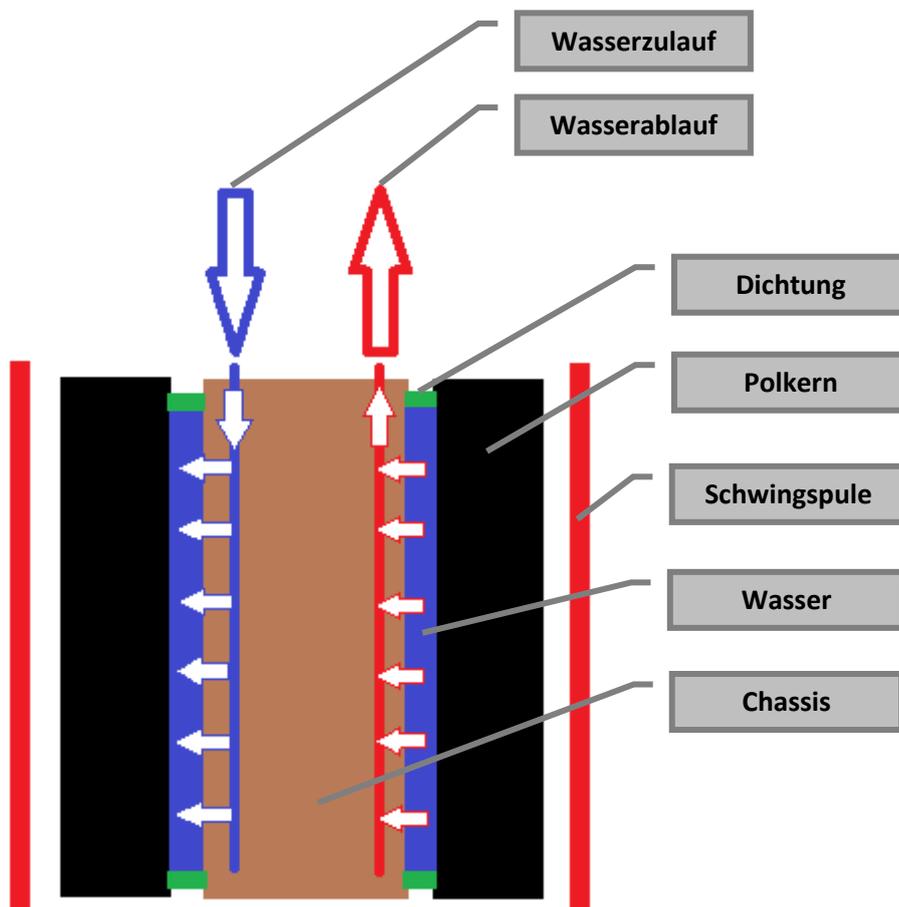


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der Wasserkühlung [Eigene Darstellung]. Die blauen Pfeile versinnbildlichen das einströmende kalte Wasser aus dem Wasserzulauf. Die roten Pfeile versinnbildlichen das ausströmende erwärmte Wasser, nachdem es dem Polkern seine thermische Energie entzogen hat.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Schlüsselbegriffe

2.1.1 Lautsprecher

Lautsprecher bezeichnet das elektroakustische Wandlersystem, welches Schall erzeugt und in einer Entfernung vom Wandler zu hören ist (Audio Engineering Society, 2012, S. 5).

2.1.2 Treiber

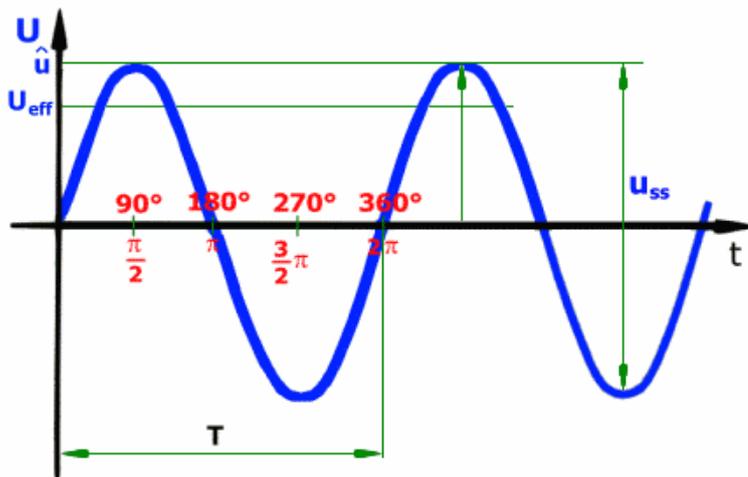
Treiber bezeichnet den elektroakustischen Wandler selbst. Er wird in Kombination mit z.B. dem Gehäuse oder einem Horn verwendet, um einen Lautsprecher bzw. ein Lautsprechersystem zu konstruieren (Audio Engineering Society, 2012, S. 5).

2.1.3 Beweglicher Spulentreiber

Ein Treiber, dessen Antriebsmechanismus darauf beruht, dass Strom durch die im Magnetfeld platzierte Spule fließt (Audio Engineering Society, 2012, S. 5).

2.1.4 Scheitelwert und Effektivwert

Die Begriffe Scheitelwert und Effektivwert dienen dem Verständnis des Crest-Faktors und werden daher kurz am Beispiel einer sinusförmigen Wechselspannung in Abbildung 4 erklärt: Der Scheitelwert \hat{u} bezeichnet den maximalen Wert der Spannung während einer Halbperiode. Der Effektivwert U_{eff} (englisch: Abkürzung RMS für Root Mean Square) bezeichnet den quadratischen Mittelwert der Wechselspannung (elektrotechnik-fachwissen, 2002).



© www.elektrotechnik-fachwissen.de

Abbildung 4: Erklärung des Effektiv- und Scheitelwerts am Beispiel einer sinusförmigen Wechselspannung (elektrotechnik-fachwissen, 2002). Der Scheitelwert \hat{u} bezeichnet den maximalen Wert der Spannung während einer Halbperiode und der Effektivwert U_{eff} bezeichnet den quadratischen Mittelwert der Wechselspannung.

2.1.5 Crest-Faktor

Der Crest-Faktor oder auch Scheitelfaktor genannt, beschreibt das Verhältnis vom Scheitelwert zum Effektivwert. Er ist immer größer oder gleich 1 und dient als grober

Anhaltspunkt zur Beschreibung der Kurvenform einer Wechselgröße, wie z.B. einer Wechselspannung oder eines Wechselstroms.

Der Crest-Faktor der Größe X ist wie folgt definiert: $k_s = \frac{x_{max}}{x_{eff}}$

Für Sinusschwingungen, wie in der Akustik üblich, beträgt der Scheitelfaktor $k_s = \sqrt{2} = 1,414$ (UdK Berlin Sengpiel, 2006).

In dieser Ausarbeitung wird der Crest-Faktor im logarithmischen Maßstab Dezibel [dB] betrachtet. Bei der Bewertung der Leistungsverstärkung, also dem Produkt aus Spannungs- und Stromverstärkung, gelten die folgenden Eckdaten aus Abbildung 5:

3 dB ≡	2 fache Leistung	(-3) dB ≡ Dämpfung auf den Wert 0,5
6 dB ≡	4 fache Leistung	(-6) dB ≡ Dämpfung auf den Wert 0,25
10 dB ≡	10 fache Leistung	(-10) dB ≡ Dämpfung auf den Wert 0,1
12 dB ≡	16 fache Leistung	(-12) dB ≡ Dämpfung auf den Wert 0,0625
20 dB ≡	100 fache Leistung	(-20) dB ≡ Dämpfung auf den Wert 0,01

Abbildung 5: Eckdaten für die Leistungsverstärkung im logarithmischen Maßstab Dezibel [dB] (Sengpiel, 2014).

2.1.6 Powercompression

Die Powercompression ist eine Form der Effizienzminderung, die aufgrund des Materials der Schwingspule selbst entsteht. Der Temperaturwiderstandskoeffizient von Kupfer und Aluminium beträgt ca. 0,4%, weshalb sich der Lautsprecher physikalisch bedingt erhitzt. Ein Temperaturanstieg von 250 °C verdoppelt den Spulenwiderstand und verringert damit die Spannungsempfindlichkeit. Folglich liefert möglicherweise also eine Endstufe z.B. statt 200 Watt nur noch 100 Watt und die Schalleistung halbiert sich (Borwick, 2001, S. 75).

2.1.7 Power Handling

In einem ineffizienten System wie einem Lautsprecher zeigt sich die verschwendete Energie zum großen Teil in Form von Wärme. Die meisten Hersteller bewerten ihren Lautsprecher unter anderem danach, wie viel Leistung sie unter bestimmten Bedingungen vertragen, ohne Schaden zu nehmen. Diese Größe wird in der Regel mit dem Power Handling beschrieben (Borwick, 2001, S. 74). Aus dem Power Handling lassen sich im späteren Verlauf dieser Ausarbeitung die Belastungen ableiten, die für die Temperaturuntersuchung verwendet wurden.

2.2 Power Handling des verwendeten Treibers

Das Nominal Power Handling des für die Temperaturuntersuchung verwendeten Treibers (Eighteen Sound 18TLW3000 - siehe 3.2.1) beträgt laut Hersteller bis zu 1800 Watt AES. Als Testsignal für das Nominal Power Handling wurde ein rosa Rauschen im Intervall Fs-10Fs über einen Zeitraum von zwei Stunden verwendet. Der Treiber befand sich zu diesem Zeitpunkt in freier Luft (eighteensound, 2014, S. 3).

2.3 Aufbau beweglicher Spulentreiber

Die Abbildung 6 zeigt den Aufbau eines typischen elektrodynamischen Konuslautsprechers mit konventionellem Ferrit-Ringmagneten und soll dem Verständnis einiger Schlüsselbegriffe in dieser Ausarbeitung dienen.

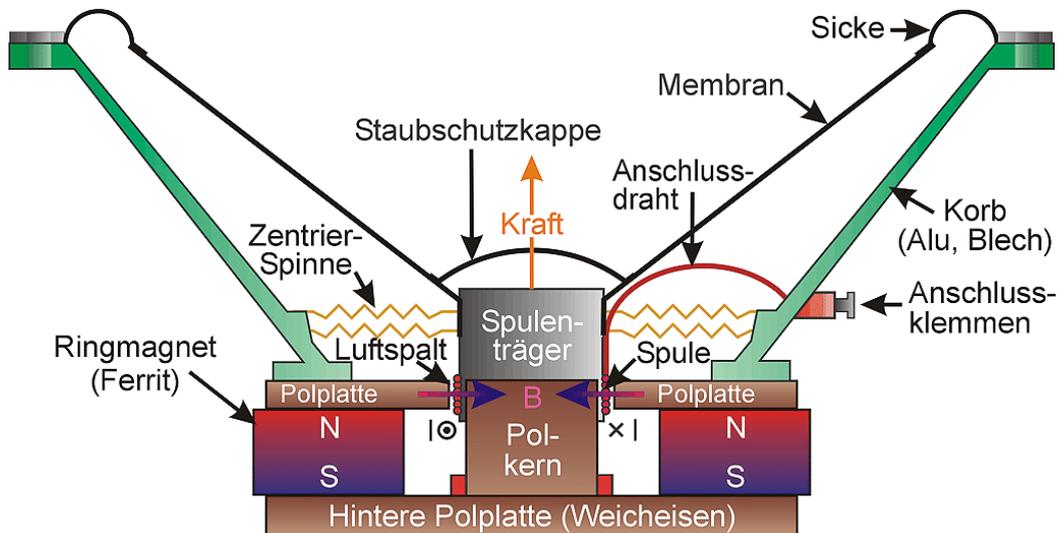


Abbildung 6: Die Darstellung zeigt den typischen Aufbau eines elektrodynamischen Konuslautsprechers mit konventionellem Ferrit-Ringkernmagneten (Behler, 2015).

2.4 Berechnung der Schwingspulentemperatur

Zur Berechnung der Schwingspulentemperatur dient die folgende Formel (elektrisola, 2020) nach T umgestellt:

$$R_T = R_{20} * [1 + \alpha * (T - 20^\circ\text{C})] \quad | \text{ nach T}$$

$$T = \frac{\left(\frac{R_T}{R_{20}} - 1\right)}{\alpha} + 20^\circ\text{C}$$

Dabei gilt:

- α Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes
- R_T Widerstand der Wicklung bei der Temperatur T
- R_{20} Widerstand der Wicklung bei 20 °C

2.5 Temperaturkoeffizient von Kupfer

Der Temperaturkoeffizient von Kupfer beträgt $\alpha_{Cu} = 3,93 \cdot 10^{-3}$ und dient zur Berechnung der Schwingspulentemperatur (elektrisola, 2020).

2.6 Berechnung der elektrischen Leistung

Zur Berechnung der elektrischen Leistung P dient die folgende Formel (Warschkow, 2020):

$$P = U * I$$

Dabei gilt:

- U elektrische Spannung
- I elektrische Stromstärke

2.7 Herausforderung der Hochleistungslautsprecher

John Borwick diskutiert die Herausforderungen bei der Entwicklung von Hochleistungslautsprechern und das Zusammenspiel zwischen thermischem Einfluss und Effizienz (Borwick, 2001, S. 74-75). Die Herausforderung bei der Konstruktion von Hochleistungslautsprechern ist wie folgt: Die hohe Leistung erzeugt eine hohe mechanische Belastung. Deshalb müssen Membran und Sicke entsprechend massiver und stabiler ausgelegt werden. Dieses zusätzliche Gewicht bewirkt eine geringere Effizienz. Um das auszugleichen, muss wiederum dem System mehr Leistung zugeführt werden. Dadurch steigt die Temperatur weiter und der Effekt der Powercompression wächst. Ein Spulentemperaturanstieg von 250 °C kann bewirken, dass sich eine 50-mm-Schwingspule um 0,4 mm ausdehnt. Dies erfordert einen erweiterten Luftspalt zwischen Polkern und Schwingspule, wodurch der BI-Faktor sinkt und die Effizienz erneut fällt. Hr. Borwick kommt also zu der Erkenntnis, dass bewegliche Spulentreiber auf Effektivität ausgelegt werden müssen. Dies gelingt mittels effektiver Kühlmaßnahmen, die den Spulentemperatur-Hub minimieren bzw. einen engeren Luftspalt zwischen Polkern und Polplatte in der Konstruktion des Lautsprechers erlauben. Diese Einblicke untermauern den Sinn und die Relevanz dieser Ausarbeitung. Weitere themenrelevante Einblicke, wie z.B. die Temperaturwiderstandskoeffizienten von Kupfer und Aluminium, gängige Kühlmechanismen (Pol-Erweiterung und Ferrofluid) und andere Möglichkeiten der Leistungsoptimierung werden kurz beleuchtet. In Bezug auf die Notwendigkeit einer Belastbarkeitsoptimierung äußert sich Hr. Borwick kritisch. Seiner Meinung nach kommt es dem Nutzer auf Qualität und nicht auf Quantität an. Der Lautsprecher würde bei einer elektrischen Leistungssteigerung lediglich noch mehr Verzerrern, als er es ohnehin schon im Grenzlastbereich täte.

2.8 Gängige Kühlmechanismen

Die Wahl einer größeren Schwingspule kann die Kühlwirkung optimieren. Sie erlaubt unter Umständen die Verwendung einer einfach anstatt doppelt gewickelten Schwingspule, wodurch eine größere Wirkoberfläche für die Luftkühlung entsteht (Borwick, 2001, S. 75).

Der Luftaustausch im Luftspalt der Schwingspule ist ein weiterer gängiger Kühlmechanismus. Hierfür wird i.d.R. das Pumpen der Membran genutzt, um einem Hitzestau vorzubeugen. Diese Form der Kühlung ist mit Vorsicht zu genießen, da bei großem Membranhub turbulente Luftströme bzw. Störgeräusche entstehen können (Borwick, 2001, S. 75).

Die Polerweiterung dient als ein zusätzlicher Kühlkörper, ohne das Magnetfeld zu beeinflussen (siehe Abbildung 7 unter A). Sie nimmt die Wärme auf und kann diese an weitere Baugruppen, wie z.B. externe Kühlrippen weiterleiten.

Die Kühlung mittels Ferrofluid ist eine sehr effektive Methode, bei der eine magnetische Flüssigkeit die Schwingspule umgibt (siehe Abbildung 7 unter B). Sie wird durch das Magnetfeld selbst im Magnetspalt gehalten und leitet die Wärme deutlich besser als Luft. Die Treiber müssen für die Verwendung von Ferrofluid ausgelegt sein. Zudem führt die Benutzung von Ferrofluid zu einer gewissen viskositätsabhängigen Dämpfung (Borwick, 2001, S. 75-76).

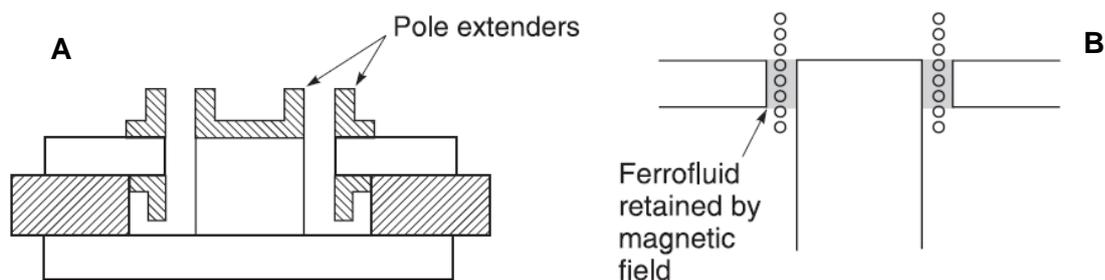


Abbildung 7: Gängige Lautsprecher-Kühlmechanismen (Borwick, 2001, S. 76). (A) Die Polerweiterungen (Pole extenders) dienen als zusätzliche Kühlkörper ohne das Magnetfeld zu beeinflussen. (B) Das Ferrofluid wird durch das Magnetfeld selbst im Magnetspalt gehalten und leitet die Wärme deutlich besser als Luft. Der Treiber muss für diese Form der Kühlung ausgelegt sein.

Während der Literaturrecherche konnten ausschließlich für Hochtontreiber, aber nicht für Tieftontreiber, Ferrofluid-Lösungen ermittelt werden. Einen Wasserkühlmechanismus, wie er für diese Ausarbeitung entwickelt wurde, gibt es nach eigenen Recherchen bislang noch nicht. Er bietet daher Potential für neue Forschungserkenntnisse.

2.9 Positionierung der Wasserkühlung

Die folgende Abbildung 8 zeigt die Struktur des zu untersuchenden Lautsprechers. Sie lässt erahnen, dass am Bereich des Polkerns unter anderem der höchste Temperaturanstieg zu erwarten ist. Aus diesem Grund soll dort die Wasserkühlung angebracht werden, damit möglichst effizient und direkt die thermische Energie übertragen werden kann.

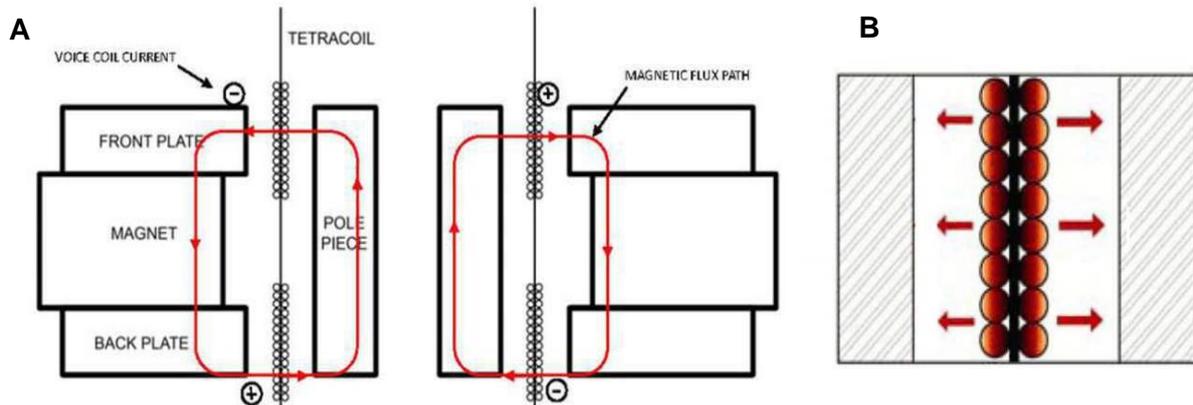


Abbildung 8: (A) zeigt einen Ausschnitt des schematischen Aufbaus des zu untersuchenden Tiefton-Treibers. Er dient zur Einordnung von (B), die die Schwingspule in Detailansicht mit Schwerpunkt auf die Hitzeabstrahlung zeigt. Hieraus geht hervor, dass unter anderem im Polkern (Pole Piece) der höchste Temperaturanstieg zu erwarten ist (eighteensound, 2020)

3 Methodik

3.1 Wasserkühlung

3.1.1 Verwendetes Material

Für die Herstellung der Wasserkühlung wurde das folgende Material der Tabelle 1 verwendet:

Tabelle 1: Für die Herstellung der Wasserkühlung verwendetes Material [Eigene Darstellung]. Bedeutung der verwendeten Abkürzungen: Pos. – Position, Mg. – Menge, pschl. – pauschal.

Komponentenliste - Wasserkühlung			
Pos.	Beschreibung	Produktbezeichnung	Mg.
Maschinen			
1	Tischbohrmaschine	OPTIMUM OPTIdrill D23Pro	1
2	Drehmaschine	Quantum D 210 x 400 Vario	1
Werkzeuge			
3	Drehmeißel A	Klemmdrehhalter mit Wendeschneidplatte	1
4	Drehmeißel B	Abstechstahlhalter Schafthöhe 16 mm mit HSS-Messer	1
5	Zentrierbohrer	Zentrierbohrer 3,15 mm HSS	1
6	Spiralbohrer	HSS Spiralbohrer-Set 19-tlg. nach DIN 338	1
7	Gewindebohrer	Maschinengewindebohrer DIN 374 HSSE Form C M10x1	1
8	Windeisen	passend für Gewindebohrer	1
9	Kegelsenker	Kegelsenker DIN 335 HSS Zylinderschaft 90° 15 mm	1
10	Handsäge	Metalbügelsäge	1
11	Messer	Cuttermesser	1
Hilfswerkzeug			
12	Messschieber	GEDORE Messschieber digital Weite 153 mm	1
13	Tiefenmessschieber	FORMAT Tiefenmessschieber gerade Messstange 150 mm	1
14	Schraubstock	BGS 59270	1
15	Druckluft	Würth Druckluftspray	1
Material			
16	Material-Chassi	Rundstab "Durchmesser" 50 mm POM	1
17	Dichtring	O Ring NBR 70 Shore 42x2 mm	2
18	Schlauchverbindung	Gewindetülle AG1/8", 6 mm	2
19	Gewindedichtung	PTFE-Band	pschl.
Arbeitsschutz			
20	PSA	Schutzbrille, Gehörschutz, geeignete Kleidung	1

3.1.2 Allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise

Zur Analyse des thermischen Grenzlastverhaltens in Abhängigkeit von aktiver Kühlung bietet die Wasserkühlung die Grundlage. Demnach ist ihre Entwicklung ein wesentlicher Bestandteil dieser Untersuchung. Im Fortlaufenden wird daher der Entstehungsprozess in einem angepassten und beschränkten Umfang betrachtet. Die Entwicklung orientierte sich zwar an dem Leitfaden des methodischen Konstruierens (Dietz, 2019), war jedoch bei weitem nicht so umfangreich. Im Folgenden werden daher die Richtlinien des methodischen Konstruierens kaum befolgt. Zudem sind exakte Fertigungszeichnungen bzw. Maßangaben bewusst nicht mit aufgeführt, denn das explizite Erstellen von Kopien ist nur unter Umständen nach persönlicher Absprache gewünscht.

Beschreibung des funktionalen Aufbaus der Wasserkühlung

Der Schlauchverbindung-Zulauf und der Schlauchverbindung-Ablauf ermöglichen eine Kupplung des PVC-Aquarienschlauches und realisieren als Bindeglied einen leckagefreien Volumenstrom.

Die Dichtungen oben / unten stellen eine berührende statische Dichtstelle zwischen der Wasserkühlung und dem Polkern her und verhindern somit einen ungewünschten Wasseraustritt.

Der Wassereintritt und -austritt ist jeweils durch eine Bohrung (auf den Abbildungen nicht sichtbar) mit dem Wasserzu- und -ablauf verbunden. Die langgezogene Öffnung optimiert ein gleichmäßiges Ein- und Ausströmen des Wassers und sorgt damit für eine ausgeglichene vollflächige Kühlwirkung am Polkern. Der Zulauf befindet sich exakt 180° gegenüber vom Ablauf, wodurch sich rein theoretisch der Volumenstrom in zwei Hälften teilt.

Das Chassis hat sowohl konstruktive als auch funktionelle Aufgaben. Als Montagerahmen bietet es die Möglichkeit zur Befestigung der Dicht- und Verbindungselemente und als Bauteil fungiert es als formschlüssiges Zentrierungs- und Positionierungselement. Zudem ist das Chassis in Kombination mit dem Polkern eine Art Kanal, durch den der Volumenstrom hindurchfließt.

Die Höhe des Absatzes bestimmt die Größe der Wasserdurchgangsfläche am Polkern. Mit ihm kann der Volumenstrom dort beschleunigt bzw. gedrosselt werden.

Die Bohrungen-Luftzirkulation gehen jeweils komplett von oben nach unten durch das Chassis und ermöglichen weiterhin die durch die Membranschwingung verursachte Luftzirkulation. Durch die Wasserkühlung ist der Durchgang im Polkern geschlossen. Anhand der Bohrdurchmesser kann ein äquivalenter Durchgang wiederhergestellt werden. In diesem Entwurf befinden sich insgesamt vier Bohrungen. Für eine bessere Ansicht auf die Bohrungen empfiehlt sich die Draufsicht im Anhang (siehe Anhang Abbildung 1).

Die Vertiefung, die auf der Abbildung nicht sichtbar ist, ermöglicht eine plane Positionierung der Wasserkühlung. Am Grund des Polkerns des zu untersuchenden Treibers befinden sich schwerlösliche Klebereste der entfernten Schaumstoffabdeckung, die in der Vertiefung Platz finden. Die im Anhang befindliche Ansicht aus der Froschperspektive ermöglicht einen Blick auf die Vertiefung (siehe Anhang Abbildung 1).

3.1.4 Funktionsschema

Die folgende Abbildung 10 zeigt das Funktionsschema der oben genannten Lösungsidee (siehe 1.3) am konkreten Entwurf der Wasserkühlung. Die blauen Pfeile versinnbildlichen den Weg und die Verteilung des kalten Wassers durch den Wasserzulauf und die roten Pfeile das warme Wasser durch den Wasserablauf.

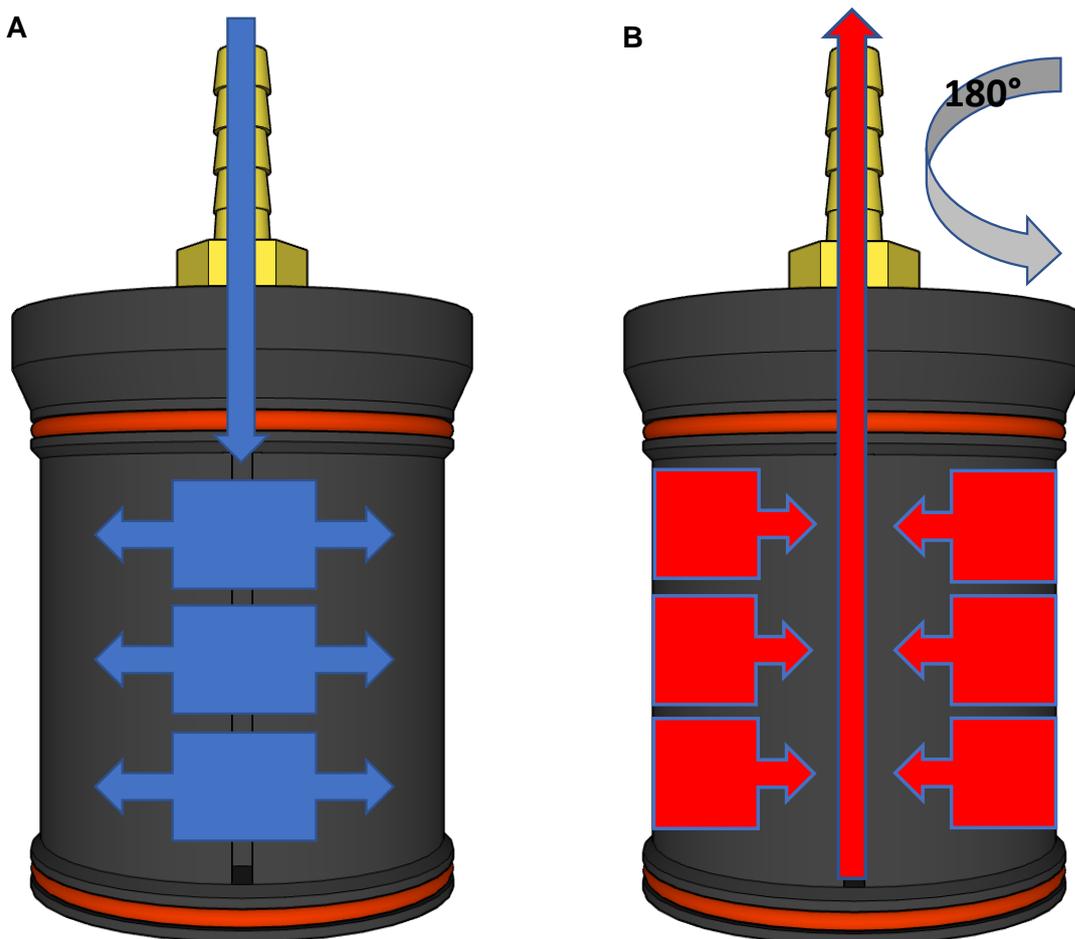


Abbildung 10: Funktionsschema der Wasserkühlung [Eigene Darstellung]. (A) Die blauen Pfeile versinnbildlichen das einströmende kalte Wasser aus dem Wasserzulauf. (B) zeigt den Entwurf der Wasserkühlung um 180° gedreht. Die roten Pfeile versinnbildlichen das ausströmende erwärmte Wasser, nachdem es dem Polkern (hier nicht zu sehen) seine thermische Energie entzogen hat.

3.1.5 Fertigungsablauf

Die Fertigung der Wasserkühlung geschah nach dem folgenden Ablauf:

- A. Rundstab auf Länge kürzen mit der Metallbügelsäge, hierbei die Bearbeitungszugabe beachten.
- B. Auf Rundlaufgenauigkeit prüfen mittels eingespanntem Werkstück im Drehfutter der Drehmaschine.
- C. Plandrehen der Stirnseiten auf die endgültige Länge mit Meißel A.
- D. Zentrierbohrungen herstellen mit dem Zentrierbohrer.
- E. Ansetzen und befestigen der mitlaufenden Zentrierspitze im Reitstock der Drehmaschine.
- F. Rundstabdurchmesser mit Meißel A auf Polkerndurchmesser längsdrehen.
- G. Anfertigung des Kegels mittels Winkelverstellung des Oberschlittens. Weiterhin Benutzung von Meißel A.
- H. Bohren der Wasserzufluss-, Wasserabflussleitungen und Bohrungen-Luftzirkulation mit dem Spiralbohrer. Vorher entsprechende Bohrvorbereitungen, wie z.B. Anreißen der Bohrlöcher, feste Positionierung auf Tischbohrmaschine etc. Anschließende Entgratung mit Kegelsenker.
- I. Vorbereitung der Gewindebohrung mittels Senkung. Anschließende Herstellung der Innengewinde für die Schlauchverbindung-Zulauf und Schlauchverbindung-Ablauf per Hand mit dem Gewindebohrer und dem Windeisen.
- J. Anbringung der Nuten für die Dichtringe. Einstechdrehen der Nuttiefe mit Meißel B unter Berücksichtigung der Einbauvorgaben der Dichtungen oben / unten (statische Abdichtung, außendichtend, Rechtecknut bei radialer Verformung (dichtomatik, 2020).
- K. Absatz längsdrehen mit Meißel A für den Kühlwasserfluss.
- L. Freiformdrehen der Vertiefung mit Meißel A.
- M. Scharfe Kanten entgraten mit Meißel B.
- N. Schlitz mit Cuttermesser freischneiden für den Wassereintritt bzw. Wasseraustritt.
- O. Reinigung des Werkstücks mittels Druckluftspray.
- P. Montage der Schlauchverbindung-Zulauf und Schlauchverbindung-Ablauf. Abdichtung der Gewinde mittels PTFE-Band.
- Q. Montage der Dichtungen oben / unten.

3.2 Temperaturuntersuchung

3.2.1 Verwendetes Material

Für die Temperaturuntersuchung wurde das folgende Material der Tabelle 2 verwendet:

Tabelle 2: Für die Temperaturuntersuchung verwendetes Material [Eigene Darstellung]. Bedeutung der verwendeten Abkürzungen: Pos. – Position, Mg. – Menge, pschl. – pauschal.

Komponentenliste - Temperaturuntersuchung			
Pos.	Beschreibung	Produktbezeichnung	Mg.
Tontechnik			
1	Lautsprecher	Eighteen Sound 18TLW3000, 4 Ohm	1
2	Subwoofer-Gehäuse	Selbstbau	2
3	Endstufe	The t.amp Proline 3000	1
4	DSP	ASC48 – Linea Research	1
5	Mixer	Pioneer DJM-600	1
6	Signalquelle	Laptop	1
7	Kabel	diverse	pschl.
Messtechnik - Temperaturuntersuchung			
8	TRMS Multimeter	CEM DT-9989	1
9	Zangenamperemeter	Signstek UT210E	1
10	Thermometer A mit einfacher Messsonde	Topop Barbeque Thermometer	2
11	Thermometer B mit doppelter Messsonde	ThermoPro TP17	1
12	Schalter	Selbstbau	1
Wasserkühlsystem			
13	Wasserkühlung	Selbstentwicklung	1
14	Wasserbehälter	Wasserbehälter 12,5 l	10
15	Schlauch	PVC-Aquarienschlauch 6 mm	2
Zubehör			
16	Verbrauchsmaterial	Gewebeband, Kabelbinder etc.	pschl.
17	Werkzeug	diverse	pschl.
18	Gehörschutz	Moldex-Schaumstoffstöpsel	pschl.

3.2.2 Allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise

Um herauszufinden, ob eine Wasserkühlung ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung von Tiefton-Hochleistungslautsprechern sein kann, wurde sowohl eine quantitative als auch eine qualitative Untersuchung durchgeführt. Die quantitative Forschung beruht größtenteils auf den Ergebnissen der qualitativen Forschung. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen eines Laborexperimentes eine Temperaturuntersuchung durchgeführt. In dieser wurde das thermische Grenzlastverhalten von Tiefton-Hochleistungslautsprechern in Abhängigkeit von aktiver und passiver Kühlung untersucht. Für die Ermittlung des aktiv gekühlten Grenzlastverhaltens kam ein Prototyp der bereits erläuterten Wasserkühlung zum Einsatz. Um dessen Einfluss und Optimierung zu beurteilen, wurden die Messungen der genannten Temperaturuntersuchung sowohl mit als auch ohne Wasserkühlung durchgeführt und miteinander verglichen. Sämtliche erhobenen Daten bestehen aus unabhängigen und abhängigen Variablen.

Die unabhängigen Variablen, wie z.B. die Endstufenausgangsspannung, sind unabhängig von anderen Einflussfaktoren des Experiments. Sie selbst sind zwar unbeeinflusst, können jedoch die abhängigen Variablen, wie z.B. die Temperaturverläufe, kontrolliert manipulieren.

Teile der folgenden Methodik mussten teilweise vereinfacht werden, um den Umfang dieser Ausarbeitung entsprechend realistisch dem zeitlichen Rahmen anzupassen und den Corona-Pandemie bedingten Einschränkungen gerecht zu werden. Das Ermittlungsverfahren der Ohm'schen Widerstände war von Vereinfachungen ausgeschlossen. Da bereits kleinste Messungenauigkeiten zu großen Abweichungen in den Rechenergebnissen führten, wird im Laufe der Methodik intensiv auf die Ermittlung dieser Werte eingegangen. Damit soll die Transparenz des Laborexperimentes gewährleistet sein.

3.2.3 Ein- und Ausschlusskriterien der erhobenen Daten

Ausschließlich Messungen, die in vollem Umfang wie geplant durchgeführt werden konnten und plausible Ergebnisse lieferten, wurden in die Temperaturuntersuchung einbezogen. Um dies bestmöglich sicherzustellen, wurde zum Erfassen der Daten mit Ein- und Ausschlusskriterien gearbeitet. So wurden vor jeder Messung die zu benutzenden Messgeräte wie das Zangenamperemeter, das Multimeter und die Thermometer weitestmöglich auf eine fehlerfreie Funktion geprüft. Ein zehn Ohm Metalloxidwiderstand diente zur Überprüfung des im Multimeter enthaltenen Ohmmeters. Die Abweichung nach zehn Messversuchen musste kleiner gleich 0,05 Ohm betragen, um nicht unter das Ausschlusskriterium zu fallen. Das Nachjustieren der am Multimeter angebrachten Krokodilklemmen war dreimal erforderlich. Zwei unterschiedliche Vergleichsthermometer dienten zum Prüfen der korrekten Kalibrierung der Thermometer. Einschlusskriterium hierbei war, dass alle Thermometer dieselbe Zahl vor dem Komma anzeigen. Dieses Kriterium haben die Geräte ausnahmslos erfüllt. Das im Multimeter enthaltene Amperemeter diente der Überprüfung des Zangenamperemeters. Testmessungen mit beiden Geräten durften keine größere Abweichung als 0,03 Ampere anzeigen. Auch hier war das Erfüllen des Einschlusskriteriums gegeben und das vergleichsweise günstige Zangenamperemeter überraschte mit äußerst genauen Messwerten. Die Wasserzulauftemperatur, also die Temperatur des noch nicht erwärmten Wassers, wurde während der Messung alle zehn Minuten mit einem Thermometer auf Veränderungen geprüft. War die Wassertemperatur von Beginn bis zum Ende der Messung nicht auf ± 1 °C konstant, war dies ein Ausschlusskriterium, da dies den Kühlprozess verfälscht hätte. Während der gesamten Messungen war dies zweimal der Fall, sodass eine direkte Auswirkung auf die Temperaturverläufe des Tiefton-Hochleistungslautsprechers erkennbar wurde und die Messungen wiederholt werden mussten. Inkorrekte Zustände, wie z.B. das Nichteinhalten der vorgegebenen Zeitabstände beim Aufnehmen der Messwerte, die Unterbrechung des Kühlwasserflusses, ein Stoppen des Messsignals, das batteriebedingte Ausgehen der

Messtechnik etc. führten zum sofortigen Beenden der Messung. Die hierbei ermittelten Werte wurden selbstverständlich nicht in die Auswertung einbezogen.

3.2.4 Messbedingungen

Die Absicht war trotz der Corona-Pandemie bedingten Einschränkungen, die Temperaturuntersuchung in einer möglichst reliablen und transparenten Laborsituation durchzuführen. Dafür wurde ein ca. 20 m² großes Zimmer im Elternhaus zum Labor umfunktioniert. Somit konnte sichergestellt werden, dass trotz der herrschenden Kontakteinschränkungen und drohender Pandemie-Maßnahmen eine Bearbeitung weiterhin möglich war. Zeitlich beschränkten sich die Messungen aufgrund der extremen Schalldruckpegel unter der Woche auf arbeitsübliche Zeiten zwischen 9:00 - 18:00 Uhr. Um möglichst identische Messbedingungen zu erhalten, wurde durch Lüften und Heizen eine konstante Raumtemperatur von 22 °C (± 1 °C) geschaffen. Die Lärmemissionen von draußen wurden nicht messtechnisch erfasst, sie waren jedoch subjektiv kaum wahrnehmbar. Das Elternhaus befindet sich im Barnim in ruhiger Umgebung und gemessen wurde nur dann, wenn es im Haus leise war. Zudem verhielten sich im Haus anwesende Personen während der Messung stets besonders leise. Lärmquellen, welche sehr tieffrequente Schalldruckpegel erzeugen, wie z.B. Baustellen, Gewerbeanlagen, Flugzeuge etc. waren im näheren Umkreis nicht vorhanden. Dies war eine wichtige Voraussetzung dafür, die Ohm'sche Messung nicht zu verfälschen, da sich die induktive Komponente des Lautsprechers ähnlich wie die eines Mikrofons verhält.

3.2.5 Durchführung

Das Ziel der Temperaturuntersuchung war, die zeitabhängige thermische Auswirkung der Wasserkühlung und der elektrischen Belastung auf Tiefton-Hochleistungslautsprechern während des Grenzlastbetriebs zu untersuchen. Hierfür wurde der zu untersuchende Treiber mittels Messsignal und elektrischer Leistung über einen Zeitraum von zwei Stunden belastet, insofern keine kritische Temperatur erreicht wurde (siehe Bemerkung unten). Die Messwerte wurden im Fünfminutentakt ermittelt. Die hierbei erzeugten Temperaturverläufe dienen sowohl zur quantitativen als auch qualitativen Forschung. Erzeugt wurden insgesamt sechs Temperaturverlauf-Diagramme mit drei unterschiedlichen Belastungen jeweils einmal passiv- und einmal wassergekühlt. Eine Erläuterung dieser Belastungen erfolgt anschließend unter 3.2.6. Die folgende Tabelle 3 beschreibt den Sachverhalt übersichtlich:

Tabelle 3: Beschreibung der Zusammensetzung der insgesamt sechs Temperaturverlauf-Diagramme [Eigene Darstellung].

Temperaturverlauf-Diagramme	passiv gekühlt	wassergekühlt
Belastung 1 $\hat{=} 225$ W RMS	1	4
Belastung 2 $\hat{=} 450$ W RMS	2	5
Belastung 3 $\hat{=} 900$ W RMS	3	6

Jedes der sechs Diagramme enthält die folgenden vier Temperaturverläufe: die Gehäusetemperatur, Magnetaußentemperatur, Magnetinnentemperatur und Schwingspulentemperatur. Die wassergekühlten Verläufe enthalten zusätzlich noch die Wasserablaufemperatur. Zu jedem Temperaturverlauf-Diagramm gehört jeweils ein Belastungsdiagramm, das parallel ermittelt wurde. Es enthält die folgenden drei zeitabhängigen Belastungsverläufe: den Schwingspulenwiderstand, die Endstufenausgangsstromstärke und die Verstärkerausgangsleistung. Eine Erläuterung aller erhobenen Variablen folgt unter 3.2.9. Eine zeitliche Betrachtung von zeitlich unabhängigen Konstanten, wie z.B. die Endstufenausgangsspannung, erscheint überflüssig und wird daher nicht in die Diagrammdarstellung einbezogen.

Bemerkung:

Bei Erreichen einer subjektiv kritischen Temperatur $T_{kritisch}$, d.h. einer Schwingspulentemperatur von über 200 °C oder einer Magnetaußentemperatur von über 100 °C, wurde das Signal unterbrochen, um eine thermische Überlastung des Treibers zu vermeiden. Aufgrund des Corona-Pandemie bedingten Laborstandortes war es wichtig, die von der Messung ausgehenden Lärmemissionen zu ansässigen Nachbarn weitestmöglich zu reduzieren. Daher wurde während der Temperaturuntersuchung ein zweites Leergehäuse vor das zu untersuchende Gehäuse gespannt (siehe Anhang Abbildung 13). Diese Form der Lärmreduzierung funktionierte erstaunlich gut und war für die Vorbeugung von Ruhestörung zwingend notwendig. Die hubabhängige und somit frequenzabhängige passive Kühlung der Luft konnte somit nicht wie in der Praxis berücksichtigt werden.

3.2.6 Belastungen

Für die Temperaturuntersuchung wurden die folgenden drei elektrischen Belastungen gewählt:

Belastung 1: 225 Watt RMS (*entspricht dem Grenzlastbetrieb mittels Musiksinal von 15 dB Crest*)

Belastung 2: 450 Watt RMS (*entspricht dem Grenzlastbetrieb mittels Musiksinal von 12 dB Crest*)

Belastung 3: 900 Watt RMS (*entspricht dem Grenzlastbetrieb mittels Musiksinal von 9 dB Crest*)

Begründung der Wahl der Belastungen

Für die Ermittlung des Nominal Power Handlings wurde der zu untersuchende Treiber laut Hersteller über einen Zeitraum von zwei Stunden mit einem rosa Rauschen belastet (eighreensound, 2014, S. 3). Angenommen, das rosa Rauschen hätte einen Crest-Faktor von 6 dB, würde das laut den genannten Eckdaten aus Abbildung 5 bedeuten, dass der Lautsprecher über einen Zeitraum von zwei Stunden mit einem Scheitelwert der vierfachen Leistung belastet wurde. Das würde bei einer Leistung von 1800 Watt RMS einen Scheitelwert von 7200 Watt ergeben. Im Folgenden wird angenommen, dass der Scheitelwert von 7200 Watt der maximalen Spitzen-Belastbarkeit und somit eine Form der Grenzlast entspricht. Hieraus lassen sich nun die oben genannten Belastungen ableiten, die jeweils einen Scheitelwert von 7200 Watt entsprechen. Die folgende Abbildung 11 veranschaulicht beispielhaft die Leistungsverstärkung.

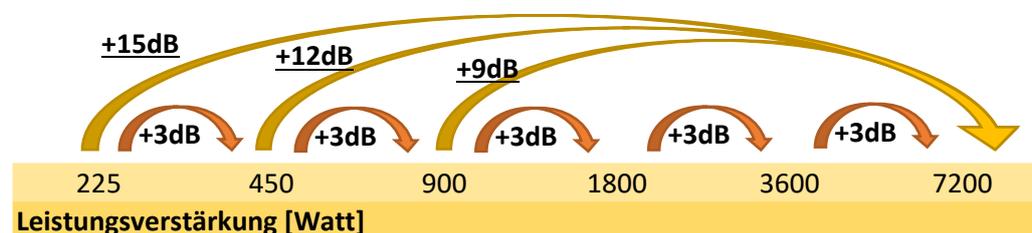


Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung der Leistungsverstärkung zur Ermittlung der Spitzen-Belastbarkeit des zu untersuchenden Tiefton-Treibers in der logarithmischen Maßeinheit Dezibel (dB) [Eigene Darstellung].

3.2.7 Signal

Für die Temperaturuntersuchung wurde ein Sinussignal von 70 Hz verwendet. Die Wahl des Signals konnte weitestgehend frei entschieden werden, da für den Rahmen dieser Untersuchung lediglich die RMS-Leistung entscheidend sein sollte und nicht die Signalform selbst.

Hintergrund zur Wahl des Signals

Aufgrund des Corona-Pandemie bedingten Laborstandortes war es wichtig, wie bereits erwähnt, die von der Messung ausgehenden Lärmemissionen zu ansässigen Nachbarn weitestmöglich zu reduzieren. Die Frequenz von 70 Hz stellte sich in einem Testversuch in Kombination mit dem zweiten vorgespannten Leergehäuse als leiseste Frequenz heraus, bei der die wenigsten resonanzverursachten Störgeräusche auftraten. In weiteren Testversuchen konnten Frequenzen unterhalb des für den Menschen üblichen Hörbereichs von kleiner als 20

Hz als ein sinnvolles Messsignal ausgeschlossen werden. So erzeugten diese bei einer Leistung von über 500 Watt RMS einen subjektiv gefährlichen Hub der Lautsprechermembran. Die Wahl eines Sinussignals schien für die Messung am geeignetsten, da hierbei die Messgeräte die genauesten Ergebnisse erzielten. Insbesondere die Werte des Zangenamperemeters schwankten auffällig stark während der Testmessungen mit einem rosa Rauschen als Messsignal. Eine mögliche Lösung für das Problem könnte ein Zangenamperemeter sein, das den Mittelwert größerer Zeitabstände bilden kann.

3.2.8 Schematischer Messaufbau

Die folgende Abbildung 12 zeigt den schematischen Messaufbau der Temperaturuntersuchung. Die Signalkette hin zum Lautsprecher besteht aus: Signalquelle → Mixer → DSP → Endstufe → Schalter → Lautsprecher. Am Schalter befindet sich das Zangenamperemeter zur Messung der Endstufenausgangsstromstärke und das Multimeter zur Messung des Ohm'schen Widerstandes. Dort fungiert das Multimeter temporär auch als Voltmeter. Die Messsonden der Thermometer und die Wasserkühlung befinden sich im Lautsprecher bzw. sind am Treiber befestigt. Dort gelangt auch das Wasser aus der Wasserzulauf-Quelle hin zur Wasserkühlung und wieder weg zum Wasserablauf-Speicher.

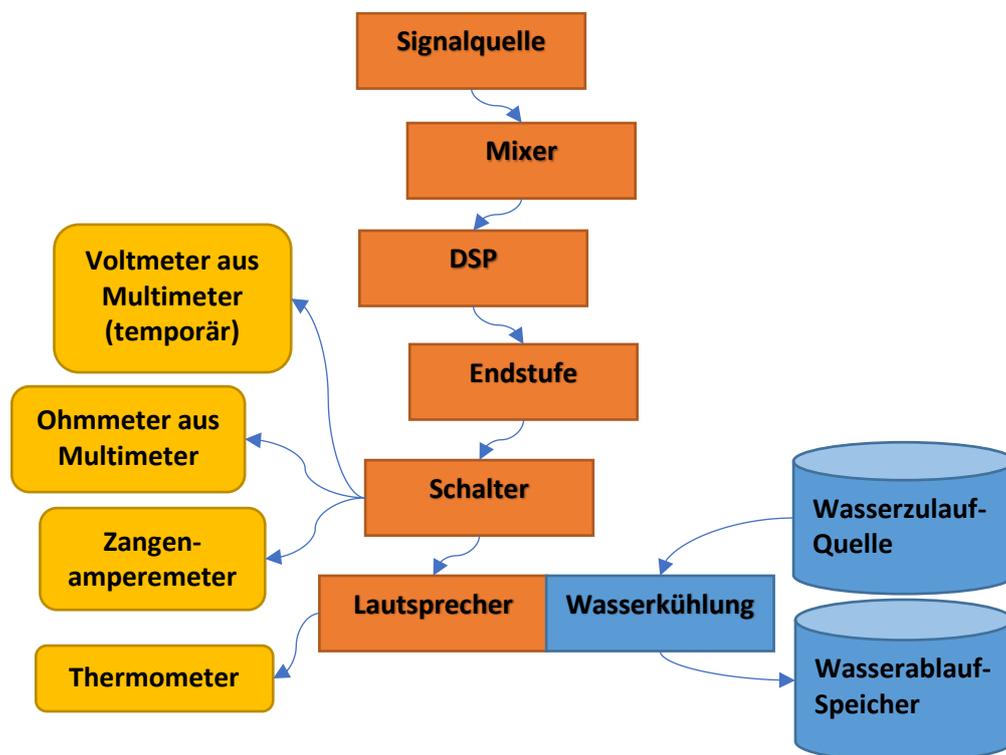


Abbildung 12: Schematischer Messaufbau für die Temperaturuntersuchung [Eigene Darstellung]. Die Signalkette hin zum Lautsprecher ist in Orange gekennzeichnet, sämtliche Messgeräte in Gelb und das Wasserkühlsystem in Blau.

3.2.9 Erläuterung der Variablen

Für eine wissenschaftliche Strukturierung des Laborexperimentes werden die Daten in abhängige und unabhängige Variablen unterteilt. **Im Anhang** befinden sich sämtliche **Fotos** der Messgeräte-Positionierung, um eine möglichst hohe Transparenz zu schaffen.

3.2.9.1 Abhängige Variablen

3.2.9.1.1 Gehäusetemperatur ($T_{\text{Gehäuse}} [^{\circ}\text{C}]$)

Die Gehäusetemperatur beschreibt die mittels Thermometer B gemessene Lufttemperatur in jenem Subwoofer-Gehäuse, worin auch der Treiber verbaut ist. Hierbei wurde auf eine zentrale und mittige Positionierung der Messsonde geachtet, da hier die Gehäusedurchschnittstemperatur zu erwarten ist (siehe Anhang Abbildung 2).

3.2.9.1.2 Magnetaußentemperatur ($T_{\text{Magnet-außen}} [^{\circ}\text{C}]$)

Die Magnetaußentemperatur beschreibt die mittels Thermometer B gemessene Lufttemperatur am äußeren Bereich des Magneten bzw. der Kühl- und Abdeckvorrichtung. Hierfür wurde die Messsonde mittels Gewebeklebeband dort an geeigneter Position befestigt (siehe Anhang Abbildung 3).

3.2.9.1.3 Magnetinnentemperatur ($T_{\text{Magnet-innen}} [^{\circ}\text{C}]$)

Die Magnetinnentemperatur beschreibt die mittels Thermometer A gemessene Lufttemperatur im Inneren des Magneten. Die Messsonde steckte hierbei direkt in einer vorhandenen Bohrung im Magneten und wurde mit einem Kabelbinder fixiert. Die Entfernung der Messsondenspitze zur Schwingspule beträgt nur wenige Millimeter, wodurch die Messwerte der realen Schwingspulentemperatur sehr nah kommen (siehe Anhang Abbildung 4).

3.2.9.1.4 Wasserablauftemperatur ($T_{\text{Wasserablauf}} [^{\circ}\text{C}]$)

Die Wasserablauftemperatur beschreibt die mittels Thermometer A gemessene Wassertemperatur, die nach dem Durchfließen der Wasserkühlung gemessen wurde. Hierfür wurde temporär händisch die Messsondenspitze für wenige Sekunden in den Ablaufkanal gehalten, bis das Thermometer einen konstanten Wert anzeigte (siehe Anhang Abbildung 5).

3.2.9.1.5 Schwingspulentemperatur ($T_{Schwing}$ [°C])

Die Schwingspulentemperatur beschreibt die mittels Formel aus 2.4 ausgerechnete Temperatur der Schwingspule in °C.

Formel: $R_T = R_{20} * [1 + \alpha * (T - 20^\circ C)]$ |nach T

$$T = \frac{\left(\frac{R_T}{R_{20}} - 1\right)}{\alpha} + 20^\circ C \quad \rightarrow \text{Formel A: } T_{Schwing} = \frac{\left(\frac{R_{Schwing}}{R_{20}} - 1\right)}{\alpha_{Cu}} + 20^\circ C$$

$$\rightarrow \text{Formel B: } T_{Schwing} = \frac{\left(\frac{R_{Schwing}}{R_{22}} - 1\right)}{\alpha_{Cu}} + 22^\circ C$$

Dabei gilt:

- $R_{Schwing}$ Ohm'scher Widerstand der Schwingspule bei Temperatur T (siehe 3.2.9.1.6)
- R_{20} Ohm'scher Widerstand der Schwingspule bei 20 °C (siehe Bemerkung unten)
- R_{22} Ohm'scher Widerstand der Schwingspule bei 22 °C (siehe 3.2.9.2.6)
- α_{Cu} Temperaturkoeffizient von Kupfer mit $\alpha_{Cu} = 3,93 \cdot 10^{-3}$ (siehe 3.2.9.2.5)

Bemerkung:

Aufgrund der gegebenen Raumtemperatur von 22 °C zum Zeitpunkt der Ermittlung der oben genannten Widerstände wurde R_{22} anstelle von R_{20} ermittelt. Demnach wurde in dieser Ausarbeitung die Formel B verwendet.

3.2.9.1.6 Schwingspulenwiderstand ($R_{Schwing}$ [Ω])

Der Schwingspulenwiderstand beschreibt den bei einer Temperatur T gemessenen reinen Ohm'schen Widerstand nur von der Schwingspule. Das heißt, es wurde mittels Multimeter der gesamte Ohm'sche Widerstand der Messkette $R_{Ohm-Ges}$ gemessen und mit einem Korrekturfaktor $R_{Korrektur}$ in Microsoft-Excel subtrahiert. Dieser Korrekturfaktor hat die Aufgabe, sämtliche verfälschenden in der Messkette enthaltenen weiteren Ohm'schen Widerstände zu beseitigen, die nicht zur Schwingspule gehören. Hierzu gehören z.B. die Leiterwiderstände der verbauten Kabel und die Übergangswiderstände von Klemmstellen. $R_{Schwing}$ wurde im Rahmen dieser Untersuchung überwiegend zur Berechnung der Schwingspulentemperatur verwendet, weshalb eine möglichst exakte Ermittlung der Werte notwendig war.

Formel: $R_{Schwing} = R_{Ohm-Ges} - R_{Korrektur}$

Dabei gilt:

- $R_{Ohm-Ges}$ ist der mittels Multimeter gemessene Wert und enthält alle in der Messkette enthaltenen Ohm'schen Widerstände
- $R_{Korrektur}$ ist ein Korrekturwert zur Bestimmung des exakten Schwingspulenwiderstandes (siehe 3.2.9.2.7)

Die Krokodilklemmen des Multimeters wurden während der Messung an vorgefertigte Kontaktstellen an einem selbstgebauten Schalter befestigt (siehe Anhang Abbildung 6). Weitere Informationen zum selbstgebauten Schalter stehen im Folgenden.

Besonderheiten zum Messaufbau

Eine Messung mit anliegendem Signal würde die komplexe Impedanz ermitteln, d.h. sowohl den induktiven, mechanischen als auch den Ohm'schen Anteil. Da für die Berechnung der oben genannten Schwingspulentemperatur nur der rein Ohm'sche Anteil benötigt wird, soll ein selbstgebaute Schalter verwendet werden. Dieser ermöglicht für den Moment des Messvorgangs eine Trennung des Endstufenausgangssignals zum Treiber. Dadurch geht sowohl die induktive als auch die mechanische Komponente gegen Null und gewissermaßen wird nur noch der Ohm'sche Anteil gemessen. Vorausgesetzt die Lärmemissionen von draußen sind niedrig genug, um sie zu vernachlässigen, da der Lautsprecher andernfalls als Mikrofon fungiert und das Messergebnis verfälschen würde. Gleichzeitig stellt der Schalter die Verbindung zum Multimeter her, sodass eine schnelle Ermittlung der Werte gewährleistet ist und sich damit die Abkühlzeit der Schwingspule auf ein Minimum reduziert. Darüber hinaus ist sichergestellt, dass zu keinem Zeitpunkt der Widerstandsmessung eine für das Multimeter gefährliche Leistung übertragen werden kann.

3.2.9.1.7 Endstufenausgangsstromstärke (I_{Ges} [A])

Endstufenausgangsstromstärke beschreibt die mittels Zangenamperemeter gemessene Stromstärke, die zum Zeitpunkt t der Messung von der Endstufe zum Treiber fließt. Hierfür wurde das Zangenamperemeter an einer zum Lautsprecher hinführenden Leitung am Schalter positioniert (siehe Anhang Abbildung 7).

3.2.9.1.8 Verstärkerausgangsleistung (P_{Ges} [W RMS])

Die Verstärkerausgangsleistung beschreibt das Produkt aus den beiden Faktoren Endstufenausgangsspannung und Endstufenausgangsstromstärke. Je nach Temperaturuntersuchung variieren die Faktoren, um die für die Messung gewünschte Größe des Produktes zu erhalten.

Formel:
$$P = U * I \quad \rightarrow \quad P_{Ges} = U_{Ges} * I_{Ges}$$

Dabei gilt:

- U_{Ges} Endstufenausgangsspannung (siehe 3.2.9.2.1)
- I_{Ges} Endstufenausgangsstromstärke (siehe 3.2.9.1.7)

3.2.9.2 Unabhängige Variablen:

3.2.9.2.1 Endstufenausgangsspannung (U_{Ges} [V])

Die Endstufenausgangsspannung beschreibt die mittels Multimeter gemessene Endstufenausgangsspannung. Hierfür wurden die Krokodilklemmen des Multimeters an zwei am Schalter befindlichen Kontaktstellen angebracht (siehe Anhang Abbildung 8). Dies war nur ein temporärer Zustand während der Spannungsermittlung. Ein vom Multimeter verursachter Spannungsabfall wurde vernachlässigt.

3.2.9.2.2 Messsignalfrequenz (f_{Signal} [Hz])

Die Messsignalfrequenz beschreibt die selbstgewählte Frequenz für das Messsignal von $f_{Signal} = 70$ Hz. Mehr Informationen zum Signal befinden sich unter 3.2.7.

3.2.9.2.3 Wasserdurchflussmenge (Q_{Wasser} [l/min])

Die Wasserdurchflussmenge beträgt 0,71 l/min und beschreibt jenen Volumenstrom an Wasser, der durch das Wasserkühlsystem strömt. Demnach ist diese Variable nur für die Messungen mit Wasserkühlung von Bedeutung. In diesem Experiment wird der Volumenstrom durch die potenzielle Energie des Wassers selbst erzeugt, es gibt also keine Pumpe. Es gibt lediglich eine hochgelagerte Wasserquelle und einen tiefgelagerten Wasserspeicher, welche in einem definierten Höhenunterschied positioniert wurden. Mittels des PVC-Aquarienschlauchs ist die Wasserquelle mit der Wasserkühlung und die Wasserkühlung mit dem Wasserspeicher verbunden. Zu Beginn der Messung wird das untere Schlauchende am Wasserspeicher angesaugt, wodurch sich das Wasser mit definiertem Volumenstrom in Bewegung setzt. In diesem Experiment war sowohl die Quelle als auch der Speicher ein 12,5 Liter Wasserbehälter (siehe Anhang Abbildung 9). Im Laufe der Messung wurde durch regelmäßiges Füllen bzw. Leeren der Behälter ein ununterbrochener Volumenstrom sichergestellt.

Bewandtnis der Wasserdurchflussmenge

Abgesehen von einem gewissen Einfluss auf die Kühlleistung, stellt die Wasserdurchflussmenge im Zuge dieser Untersuchung keine direkte Bewandtnis dar und wird daher nicht näher betrachtet. Dennoch kann sie unter Umständen in Kombination mit den anderen Variablen aufschlussreiche Informationen für eventuelle weiterführende Untersuchungen bieten, wie z.B. Dimensionierung der Wasserkühlleistung für einen geschlossenen Kreislauf, Auslegung des benötigten Pumpen-Fördervolumens zur Anwendungsoptimierung etc. Daher ist auch diese Angabe in den unabhängigen Variablen mit aufgeführt.

3.2.9.2.4 Wasserzulauftemperatur ($T_{\text{Wasserzulauf}} [^{\circ}\text{C}]$)

Die Wasserzulauftemperatur beschreibt die Wassertemperatur vor dem Kühlprozess. Im Falle der hier ausgeführten Temperaturuntersuchung kam das Wasser aus der Leitung und war daher mit $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ gegeben. Wie in den Ein- und Ausschlusskriterien beschrieben, durften die Temperaturschwankungen während der Messung nicht größer als $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ betragen.

3.2.9.2.5 Temperaturkoeffizient Kupfer (α_{Cu})

Der Temperaturkoeffizient von Kupfer beträgt $\alpha_{\text{Cu}} = 3,93 \cdot 10^{-3}$ und dient zur Berechnung der Schwingspulentemperatur.

3.2.9.2.6 Widerstand- R_{22} ($R_{22} [\Omega]$)

Widerstand- R_{22} beschreibt den mittels Multimeter gemessenen temperaturabhängigen Ohm'schen Schwingspulenwiderstand bei $T_{\text{Schwing}} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Er wird zur Berechnung von T_{Schwing} und $R_{\text{Korrektur}}$ benötigt.

Bemerkung zur Temperaturbestimmung der Schwingspule

T_{Schwing} konnte zum Zeitpunkt der Ermittlung von R_{22} noch nicht rechnerisch ermittelt werden, da R_{22} ein wesentlicher Bestandteil der Formel für T_{Schwing} ist (siehe 3.2.9.1.5). Zur Ermittlung von $T_{\text{Schwing}} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurde daher die Labortemperatur für 24 Stunden konstant auf $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) gehalten. Da der dort befindliche Tiefton-Hochleistungslautsprecher während dieser Zeit ebenfalls nicht elektrisch belastet wurde, war davon auszugehen, dass die Schwingspulentemperatur ziemlich genau $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ betrug und so R_{22} messtechnisch ermittelt werden konnte. Um einen möglichst exakten Wert zu erhalten, wurde aus zehn Messungen der Mittelwert gebildet. Hierfür wurde mit den Krokodilklemmen des Multimeters direkt am Anschlussdraht des Lautsprechers gemessen. Die folgende Tabelle 4 zeigt die Ermittlung des R_{22} . Hierbei wurden aus zehn Messungen jeweils die Mittelwerte von R_{22_Zusatz} und $R_{22_Zusatz+Spule}$ bei einer Schwingspulentemperatur von $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) gebildet. Die Differenz dieser beiden Werte ergibt den Widerstand- R_{22} .

Dabei gilt:

- R_{22_Zusatz} ist der messtechnisch ermittelte Übergangswiderstand der Krokodilklemmen des Multimeters bei $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (siehe Anhang Abbildung 11)
- $R_{22_Zusatz+Spule}$ ist der messtechnisch ermittelte Widerstand von R_{22} bei $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ incl. R_{22_Zusatz} (siehe Anhang Abbildung 10)

Tabelle 4: Ermittlung Widerstand- R_{22} [Eigene Darstellung].

Ermittlung Widerstand- R_{22}											
Temperatur [°C]	22										
Messungen:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittelwert
R_{22_Zusatz} [Ω]:	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05
$R_{22_Zusatz+Spule}$ [Ω]:	2,36	2,36	2,37	2,37	2,37	2,38	2,37	2,38	2,39	2,38	2,37
R_{22} [Ω]:											2,33

3.2.9.2.7 Widerstand-Korrekturfaktor ($R_{Korrektur}$ [Ω])

Der Widerstand-Korrekturfaktor ist ein rechnerisch ermittelter Wert und dient in dieser Ausarbeitung lediglich zur Bestimmung des exakten Schwingspulenwiderstandes. Er enthält alle in der Messkette enthaltenen Ohm'schen Widerstände außer den Schwingspulenwiderstand. Hierzu zählen z.B. die Leiterwiderstände der verbauten Kabel und sämtliche Übergangswiderstände von Klemm- und Schraubverbindungen. Der Widerstand-Korrekturfaktor $R_{Korrektur}$ hat nichts mit den in Tabelle 4 beschriebenen Zusatz-Widerständen zu tun, da die Messkette eine andere war. Im Laufe der Messvorbereitungen wurden teilweise Übergangswiderstände verändert, wie z.B. die Schrauben der Lüsterklemmen auf der selbstgebauten Schaltervorrichtung und die Kabelanschlussstellen des Lautsprechers. War dies der Fall, wurde in den jeweiligen Messvorbereitungen der Korrekturfaktor erneut bestimmt. Aufgrund dessen unterscheiden sich teilweise die Korrekturfaktoren in den Messungen voneinander.

Die Bestimmung der Korrekturfaktoren verlief wie folgt:

Formel (siehe Gültigkeitskriterium unten): $R_{Korrektur} = R_{Ohm-Ges} - R_{22}$

Dabei gilt:

- $R_{Ohm-Ges}$ ist der mittels Multimeter gemessene Wert und enthält alle in der Messkette enthaltenen Ohm'schen Widerstände
- R_{22} Schwingspulenwiderstand bei $T_{Schwing} = 22\text{ °C}$ (siehe 3.2.9.1.5)

Gültigkeitskriterium für diese Formel ist, dass zum Zeitpunkt der Messung von $R_{Ohm-Ges}$ sämtliche in der Messkette relevanten elektrischen Leiter eine Temperatur von 22 °C besitzen, wie auch R_{22} zum Zeitpunkt seiner Messung. Dies wurde sichergestellt, indem mindestens zwölf Stunden vorher eine konstante Labor-Raumtemperatur von 22 °C ($\pm 1\text{ °C}$) herrschte und der Lautsprecher während dieser Zeit nicht elektrisch belastet wurde.

4 Ergebnisse

4.1 Wasserkühlung

Die Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen den fertiggestellten Prototypen, der für die Temperaturuntersuchung gedient hat. Er ist das Ergebnis einer erfolgreichen Entwicklung, Konstruktion und Fertigung einer Wasserkühlung. Inwieweit das Funktionsprinzip bezogen auf die Wärmeableitung effektiv gestaltet wurde, wird in den Ergebnissen der Temperaturuntersuchung ersichtlich.

Bemerkung:

Der Wasserzulauf hat einen konischen Verlauf, anders als im Entwurf. Sein Sinn und Zweck ist, dem über die Zulaufänge entstehenden Druckabfall entgegenzuwirken und von oben nach unten einen möglichst gleichmäßigen Wasseraustritt zu erlangen. Dies hat in Testversuchen bemerkenswert gut funktioniert. In folgenden Kontrollen mittels durchsichtigem Plexiglasrohr statt Polkern konnten weitere Bedenken ausgeräumt werden. So werden bereits bei geringstem Volumenstrom komplette Luftrückstände aus dem System gedrückt und es sammeln sich keine Luftblasen am Chassis der Wasserkühlung.

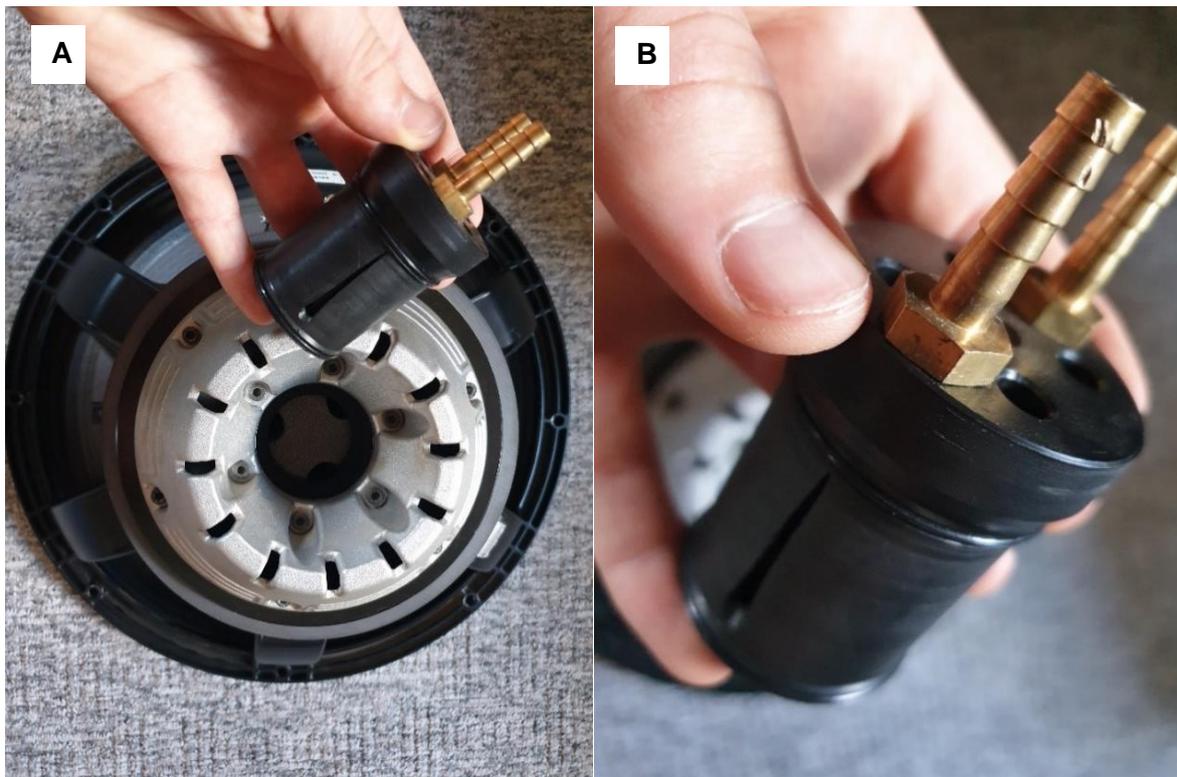


Abbildung 13: Fertiggestellter Prototyp der Wasserkühlung, welcher für die Temperaturuntersuchung gedient hat [Eigene Darstellung] - (A) zeigt die Wasserkühlung vor dem zu untersuchenden Treiber. (B) zeigt eine Detailansicht der Wasserkühlung. Die Hand dient dem Größenvergleich.



Abbildung 14: Eingebaute Wasserkühlung mit aufgestecktem PVC-Aquarienschlauch jeweils für den Zu- und Ablauf (der Kabelbinder ist nicht Teil des Wasserkühlsystems) [Eigene Darstellung].

4.2 Temperaturuntersuchung

Die Belastbarkeitsoptimierung von Tiefton-Hochleistungslautsprechern mittels Wasserkühlung wurde in Form einer Temperaturuntersuchung getestet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden unter anderem auf den folgenden Seiten in Form von Diagrammen dargestellt. Die im Methodikteil erläuterten Variablen ermöglichen ein Zuordnen und Verstehen der im Diagramm enthaltenen Werte und Graphen. Zu Beginn werden die in der Methodik definierten Temperaturverlauf-Diagramme 1-6 und die dazugehörigen Belastungsdiagramme aufgeführt. Die jeweiligen ausführlichen Messwerte der Diagramme befinden sich im Anhang. Die Belastungsdiagramme dienen lediglich dazu, das Zusammenwirken von Belastung und Temperatur transparent zu gestalten. Im Anschluss werden ausschließlich die Temperaturverlauf-Diagramme sinnvoll gegenübergestellt. Mittels direkter Vergleiche zwischen Aktiv- und Passivkühlung soll hierbei die Belastbarkeitsoptimierung und der Bezug zur Fragestellung hergestellt werden. Zu guter Letzt werden die wichtigsten Kennwerte aus den Ergebnissen entnommen. Dies dient dazu, einen Überblick der Extremwerte zu schaffen und die anschließende Diskussion mittels konkreter Werte zu vereinfachen.

4.2.1 Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramme

Im weiteren Verlauf werden die in der Methodik definierten Temperaturverlauf-Diagramme 1-6 und die dazugehörigen Belastungsdiagramme aufgeführt. Tabellen ergänzen jeweils die unabhängigen Variablen, welche für die entsprechenden Diagramme verwendet wurden.

4.2.1.1 Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 1

Die unabhängigen Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 1 sind in Tabelle 5 beschrieben. Die Endstufenausgangsleistung betrug näherungsweise 225 Watt RMS, die Endstufenausgangsspannung lag bei 44,5 Volt und das Signal war ein Sinus mit einer Frequenz von 70 Hertz. Der Treiber wurde passiv gekühlt und es kam keine Wasserkühlung zum Einsatz. Der Widerstand-Korrekturfaktor wurde mit 0,19 Ohm ermittelt. Der Temperaturkoeffizient von Kupfer betrug 0,00393 und der Widerstand- R_{22} 2,33 Ohm. Das Ergebnis der Temperaturverläufe aus der ersten Temperaturuntersuchung wird in Abbildung 15 mittels Liniendiagramm präsentiert. Das zugehörige Belastungsdiagramm 1 wird in Abbildung 16 dargestellt. Die Zeitachse ist kongruent mit der aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 1. Die dazugehörigen konkreten Extrema-Kennwerte befinden sich im späteren Verlauf unter 4.2.3.1.

Tabelle 5: Unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 1 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 1					
P_{Ges} [W RMS]:	$\cong 225$	Wasserkühlung:	Nein	R_{22} [Ω]:	2,33
U_{Ges} [V]:	44,5	Q_{Wasser} [l/min]:	-	$R_{\text{Korrektur}}$ [Ω]:	0,19
Signal:	Sinus	$T_{\text{Wasserzulauf}}$ [$^{\circ}\text{C}$]:	-	α_{Cu}	0,00393
f_{Signal} [Hz]:	70				

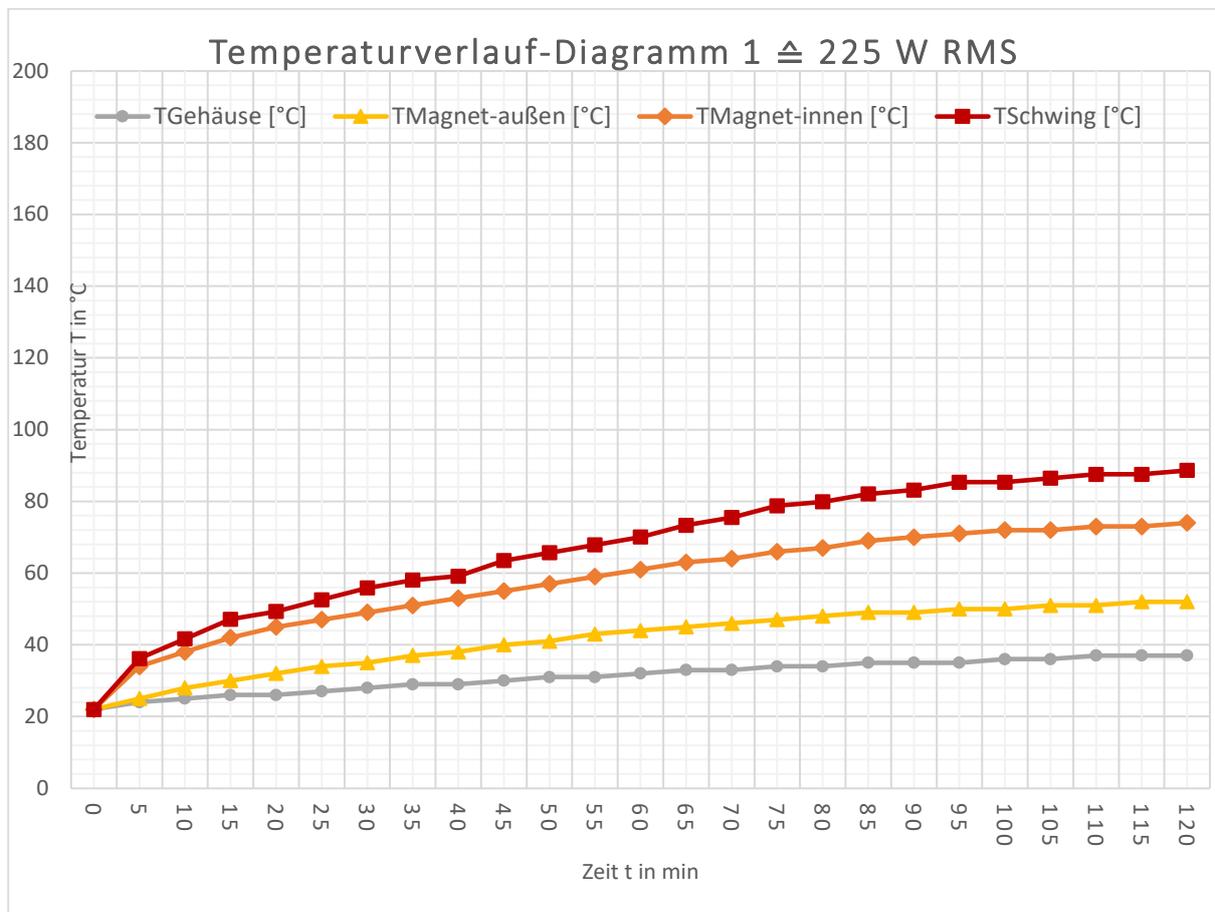


Abbildung 15: Temperaturverlauf-Diagramm 1 $\cong 225$ W RMS [Eigene Darstellung]. Ergebnis der ersten Temperaturmessung. $T_{\text{Gehäuse}}$ – Gehäusetemperatur, $T_{\text{Magnet-außen}}$ – Magnetaußentemperatur, $T_{\text{Magnet-innen}}$ – Magnetinnentemperatur, T_{Schwing} – Schwingpulentemperatur.

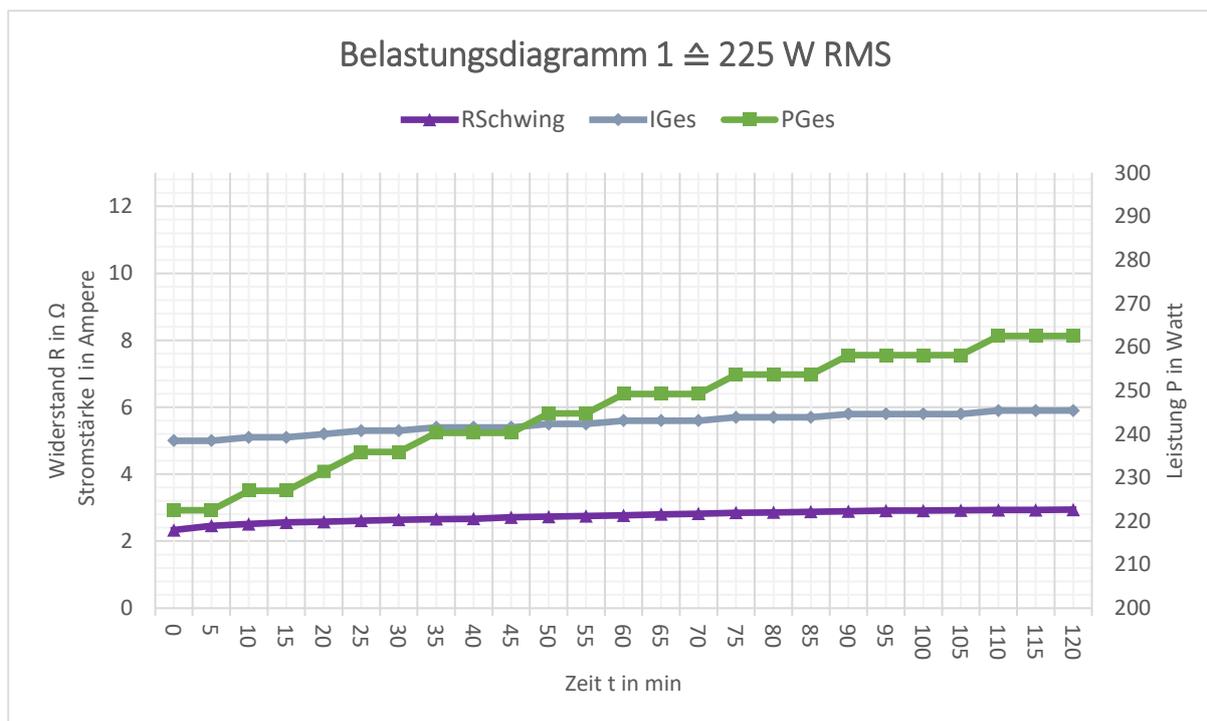


Abbildung 16: Belastungsdiagramm 1 $\hat{=} 225$ W RMS [Eigene Darstellung] – zugehörig zum Temperaturverlauf-Diagramm 1. *RSchwing* – Schwingspulenwiderstand, *IGes* – Endstufenausgangsstromstärke, *PGes* – Endstufenausgangsleistung.

4.2.1.2 Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 2

Die unabhängigen Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 2 sind in Tabelle 6 beschrieben. Die Endstufenausgangsleistung betrug näherungsweise 450 Watt RMS, die Endstufenausgangsspannung lag bei 60 Volt und das Signal war ein Sinus mit einer Frequenz von 70 Hertz. Der Treiber wurde passiv gekühlt und es kam keine Wasserkühlung zum Einsatz. Der Widerstand-Korrekturfaktor wurde mit 0,3 Ohm ermittelt. Der Temperaturkoeffizient von Kupfer betrug 0,00393 und der Widerstand- R_{22} 2,33 Ohm. Das Ergebnis der Temperaturverläufe aus der zweiten Temperaturuntersuchung wird in Abbildung 17 mittels Liniendiagramm präsentiert. Das zugehörige Belastungsdiagramm 2 wird in Abbildung 18 dargestellt. Die Zeitachse ist kongruent mit der aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 2. Die dazugehörigen konkreten Extrema-Kennwerte befinden sich im späteren Verlauf unter 4.2.3.2.

Tabelle 6: Unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 2 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 2					
P_{Ges} [W RMS]:	$\hat{=} 450$	Wasserkühlung:	Nein	R_{22} [Ω]:	2,33
U_{Ges} [V]:	60	Q_{Wasser} [l/min]:	-	$R_{Korrektur}$ [Ω]:	0,3
Signal:	Sinus	$T_{Wasserzulauf}$ [$^{\circ}C$]:	-		
f_{Signal} [Hz]:	70			α_{Cu}	0,00393

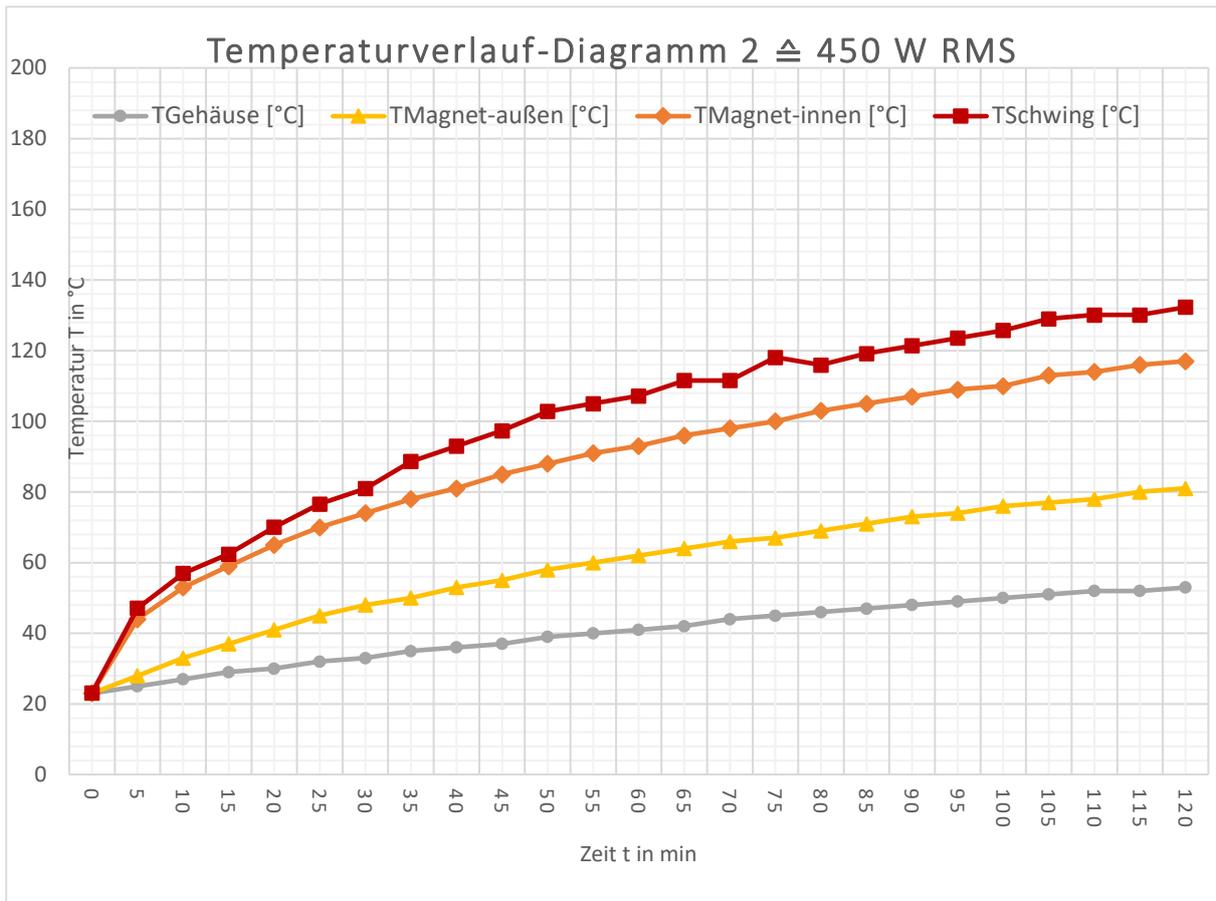


Abbildung 17: Temperaturverlauf-Diagramm 2 \cong 450 W RMS [Eigene Darstellung]. Ergebnis der zweiten Temperaturmessung. TGehäuse – Gehäusetemperatur, TMagnet-außen – Magnetaußentemperatur, TMagnet-innen – Magnetinnentemperatur, TSchwing – Schwingspulentemperatur.

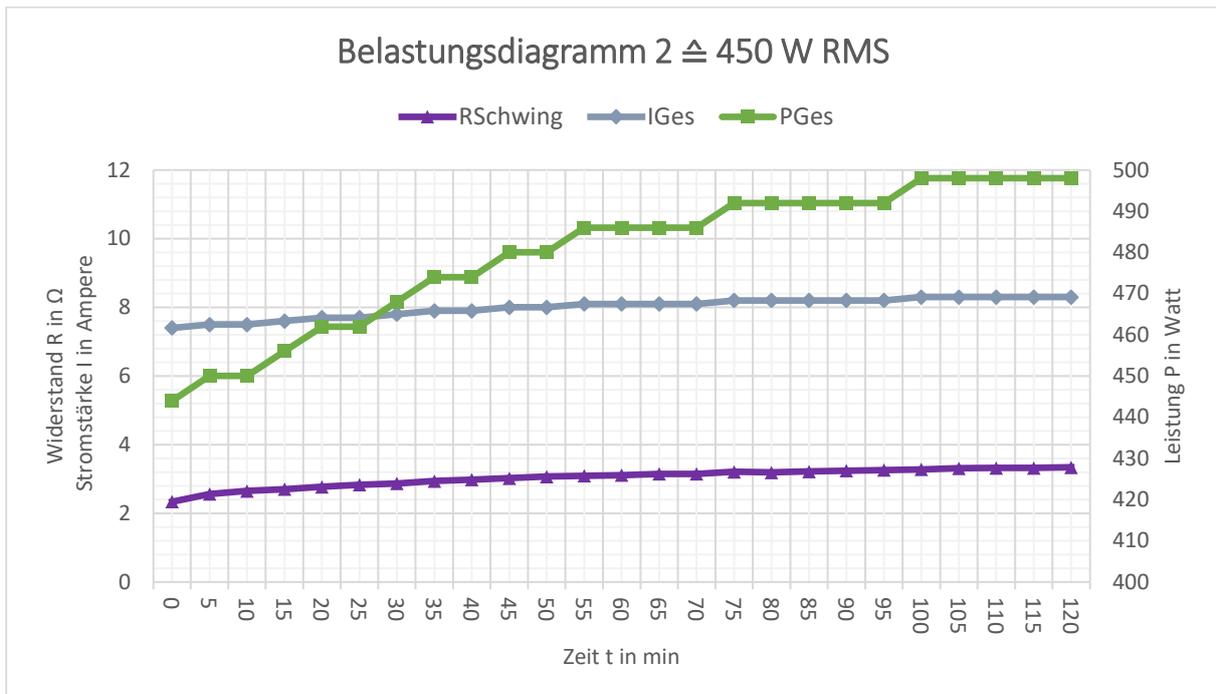


Abbildung 18: Belastungsdiagramm 2 \cong 450 W RMS [Eigene Darstellung] – zugehörig zum Temperaturverlauf-Diagramm 2. RSchwing – Schwingspulenwiderstand, IGes – Endstufenausgangsstromstärke, PGes – Endstufenausgangsleistung.

4.2.1.3 Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 3

Die unabhängigen Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 3 sind in Tabelle 7 beschrieben. Die Endstufenausgangsleistung betrug näherungsweise 900 Watt RMS, die Endstufenausgangsspannung lag bei 82 Volt und das Signal war ein Sinus mit einer Frequenz von 70 Hertz. Der Treiber wurde passiv gekühlt und es kam keine Wasserkühlung zum Einsatz. Der Widerstand-Korrekturfaktor wurde mit 0,21 Ohm ermittelt. Der Temperaturkoeffizient von Kupfer betrug 0,00393 und der Widerstand- R_{22} 2,33 Ohm. Das Ergebnis der Temperaturverläufe aus der dritten Temperaturuntersuchung wird in Abbildung 19 mittels Liniendiagramm präsentiert. Das zugehörige Belastungsdiagramm 3 wird in Abbildung 20 dargestellt. Die Zeitachse ist kongruent mit der aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 3. Die dazugehörigen konkreten Extrema-Kennwerte befinden sich im späteren Verlauf unter 4.2.3.3.

Tabelle 7: Unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 3 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 3					
P_{Ges} [W RMS]:	$\cong 900$	Wasserkühlung:	Nein	R_{22} [Ω]:	2,33
U_{Ges} [V]:	82	Q_{Wasser} [l/min]:	-	$R_{\text{Korrektur}}$ [Ω]:	0,21
Signal:	Sinus	$T_{\text{Wasserzulauf}}$ [$^{\circ}\text{C}$]:	-	α_{Cu}	0,00393
f_{Signal} [Hz]:	70				

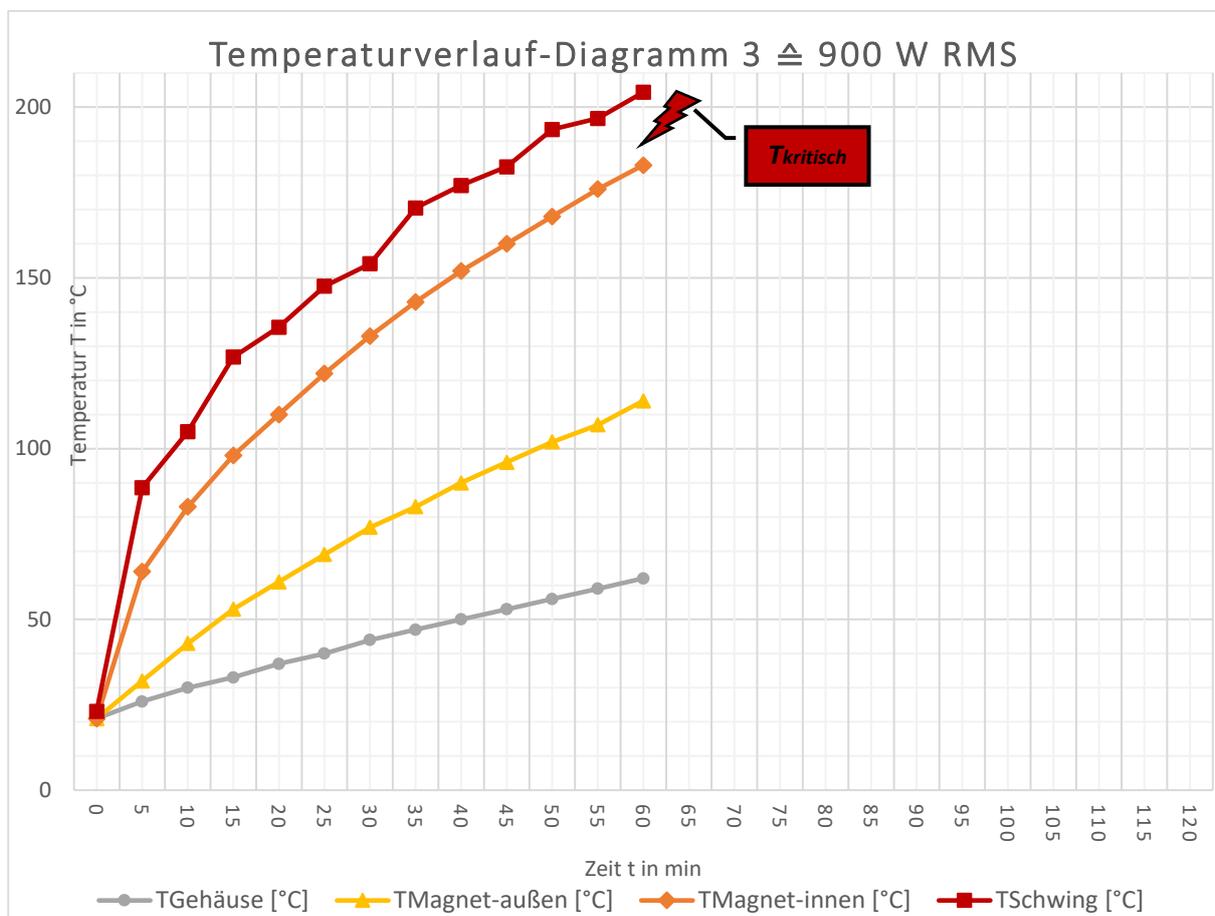


Abbildung 19: Temperaturverlauf-Diagramm 3 $\cong 900$ W RMS [Eigene Darstellung]. Ergebnis der dritten Temperaturmessung. Nach 60 Minuten wurde die Messung vorzeitig beendet, da eine kritische Schwingspulentemperatur von über 200 $^{\circ}\text{C}$ (T_{kritisch}) erreicht wurde.

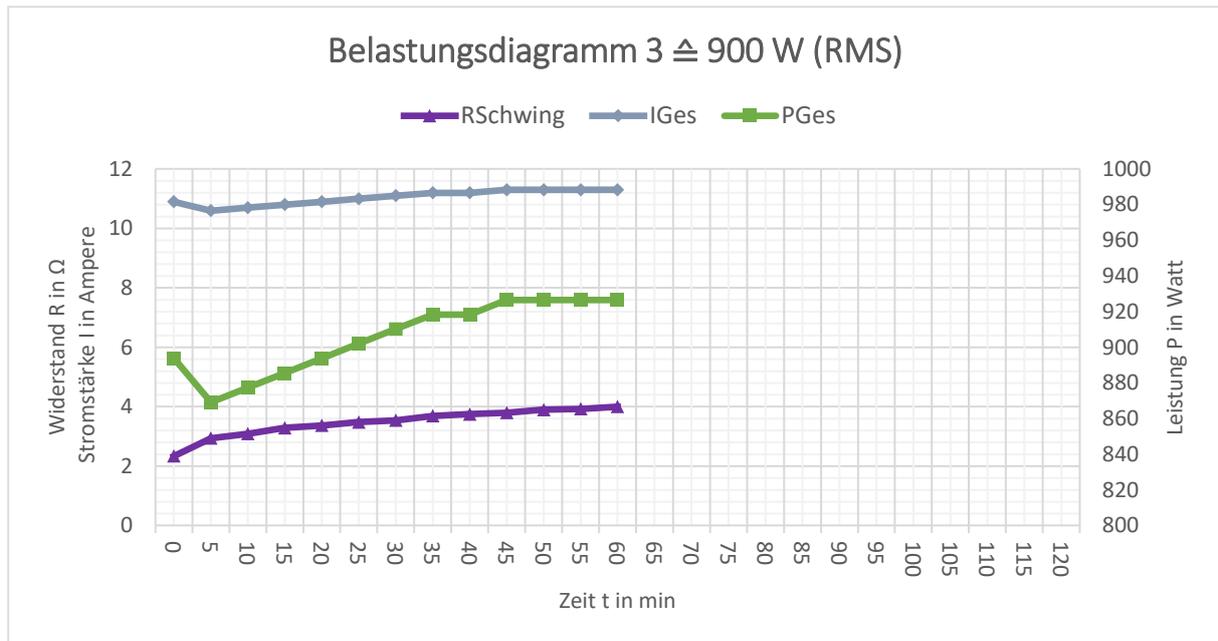


Abbildung 20: Belastungsdiagramm 3 \cong 900 W RMS [Eigene Darstellung] – zugehörig zum Temperaturverlauf-Diagramm 3. Nach 60 Minuten wurde die Messung vorzeitig beendet da eine kritische Schwingpulventemperatur (siehe Abbildung 19) erreicht wurde. R Schwing – Schwingpulswiderstand, I Ges – Endstufenausgangsstromstärke, P Ges – Endstufenausgangsleistung.

4.2.1.4 Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 4

Die unabhängigen Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 4 sind in Tabelle 8 beschrieben. Die Endstufenausgangsleistung betrug näherungsweise 225 Watt RMS, die Endstufenausgangsspannung lag bei 46 Volt und das Signal war ein Sinus mit einer Frequenz von 70 Hertz. Der Treiber wurde mittels Wasserkühlung aktiv gekühlt. Die Wasserdurchflussmenge lag bei 0,71 l/min und die Wasserzulauftemperatur bei 16 °C. Der Widerstand-Korrekturfaktor wurde mit 0,3 Ohm ermittelt. Der Temperaturkoeffizient von Kupfer betrug 0,00393 und der Widerstand- R_{22} 2,33 Ohm. Das Ergebnis der Temperaturverläufe aus der vierten Temperaturuntersuchung wird in Abbildung 21 mittels Liniendiagramm präsentiert. Das zugehörige Belastungsdiagramm 4 wird in Abbildung 22 dargestellt. Die Zeitachse ist kongruent mit der aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 4. Die dazugehörigen konkreten Extrema-Kennwerte befinden sich im späteren Verlauf unter 4.2.3.4.

Tabelle 8: Unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 4 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 4					
P _{Ges} [W RMS]:	\cong 225	Wasserkühlung:	Ja	R ₂₂ [Ω]:	2,33
U _{Ges} [V]:	46	Q _{Wasser} [l/min]:	0,71	R _{Korrektur} [Ω]:	0,3
Signal:	Sinus	T _{Wasserzulauf} [°C]:	16		
f _{Signal} [Hz]:	70			α_{Cu}	0,00393

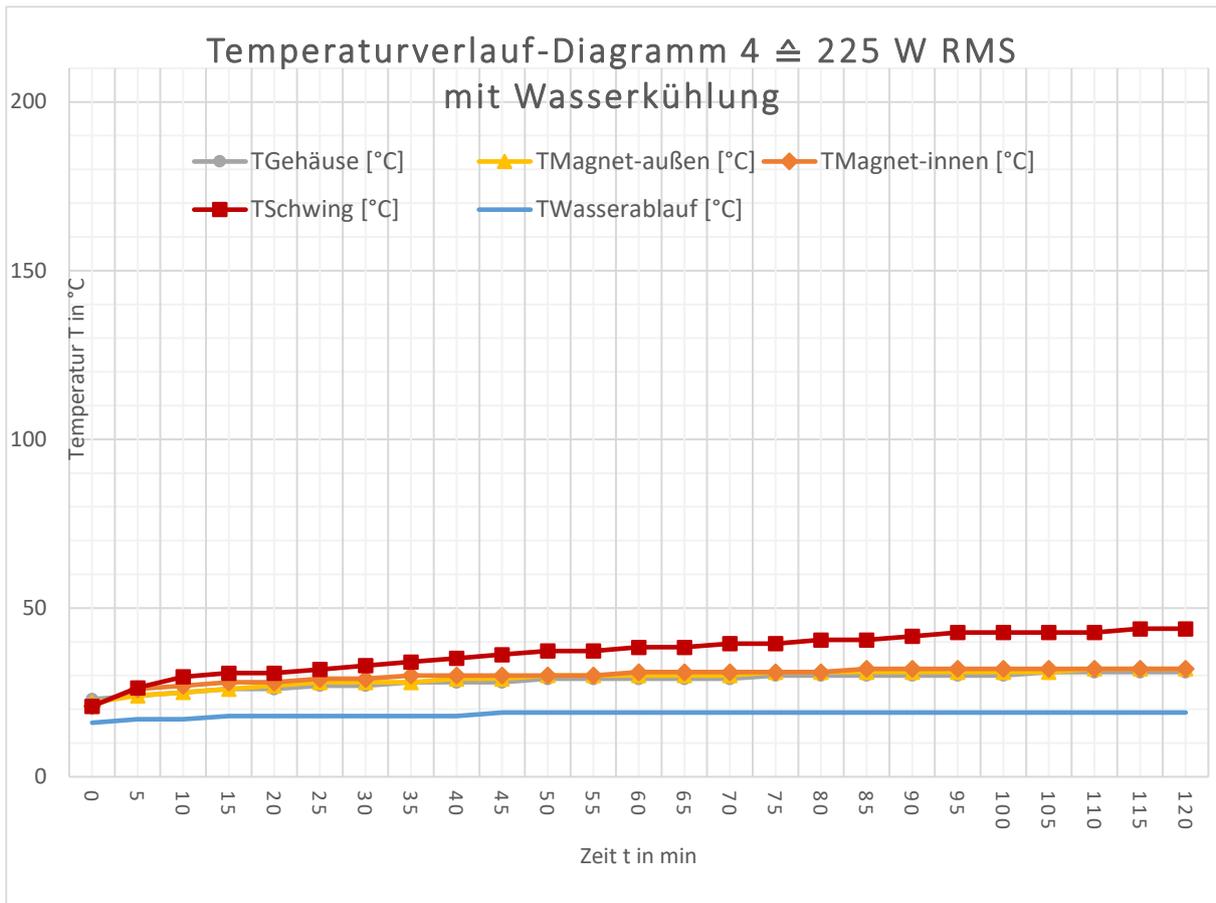


Abbildung 21: Temperaturverlauf-Diagramm 4 \cong 225 W RMS mit Wasserkühlung [Eigene Darstellung]. Ergebnis der vierten Temperaturmessung. $T_{\text{Gehäuse}}$ – Gehäusetemperatur, $T_{\text{Magnet-außen}}$ – Magnetaußentemperatur, $T_{\text{Magnet-innen}}$ – Magnetinnentemperatur, T_{Schwing} – Schwingspulentemperatur, $T_{\text{Wasserablauf}}$ – Wasserablaufftemperatur.

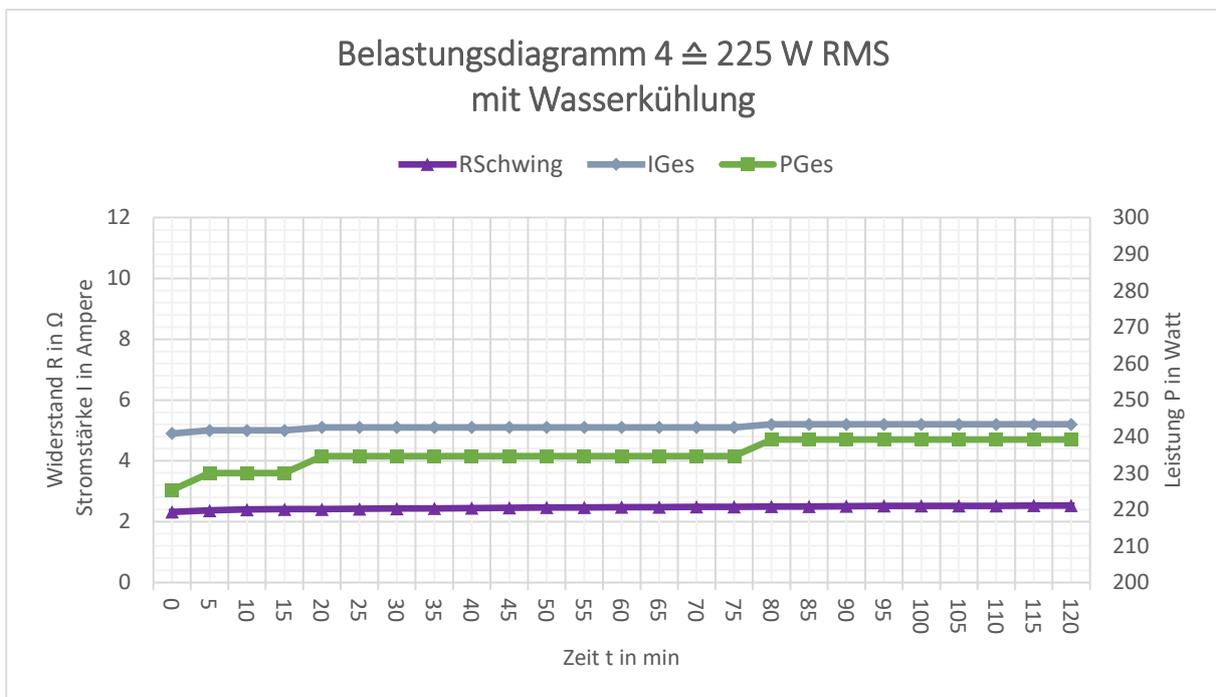


Abbildung 22: Belastungsdiagramm 4 \cong 225 W RMS mit Wasserkühlung [Eigene Darstellung] – zugehörig zum Temperaturverlauf-Diagramm 4. R_{Schwing} – Schwingspulenwiderstand, I_{Ges} – Endstufenausgangsstromstärke, P_{Ges} – Endstufenausgangsleistung.

4.2.1.5 Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 5

Die unabhängigen Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 5 sind in Tabelle 9 beschrieben. Die Endstufenausgangsleistung betrug näherungsweise 450 Watt RMS, die Endstufenausgangsspannung lag bei 65 Volt und das Signal war ein Sinus mit einer Frequenz von 70 Hertz. Der Treiber wurde mittels Wasserkühlung aktiv gekühlt. Die Wasserdurchflussmenge lag bei 0,71 l/min und die Wasserzulauftemperatur bei 16 °C. Der Widerstand-Korrekturfaktor wurde mit 0,26 Ohm ermittelt. Der Temperaturkoeffizient von Kupfer betrug 0,00393 und der Widerstand- R_{22} 2,33 Ohm. Das Ergebnis der Temperaturverläufe aus der fünften Temperaturuntersuchung wird in Abbildung 23 mittels Liniendiagramm präsentiert. Das zugehörige Belastungsdiagramm 5 wird in Abbildung 24 dargestellt. Die Zeitachse ist kongruent mit der aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 5. Die dazugehörigen konkreten Extrema-Kennwerte befinden sich im späteren Verlauf unter 4.2.3.5.

Tabelle 9: Unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 5 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 5					
P_{Ges} [W RMS]:	$\cong 450$	Wasserkühlung:	Ja	R_{22} [Ω]:	2,33
U_{Ges} [V]:	65	Q_{Wasser} [l/min]:	0,71	$R_{\text{Korrektur}}$ [Ω]:	0,26
Signal:	Sinus	$T_{\text{Wasserzulauf}}$ [°C]:	16	α_{Cu}	0,00393
f_{Signal} [Hz]:	70				

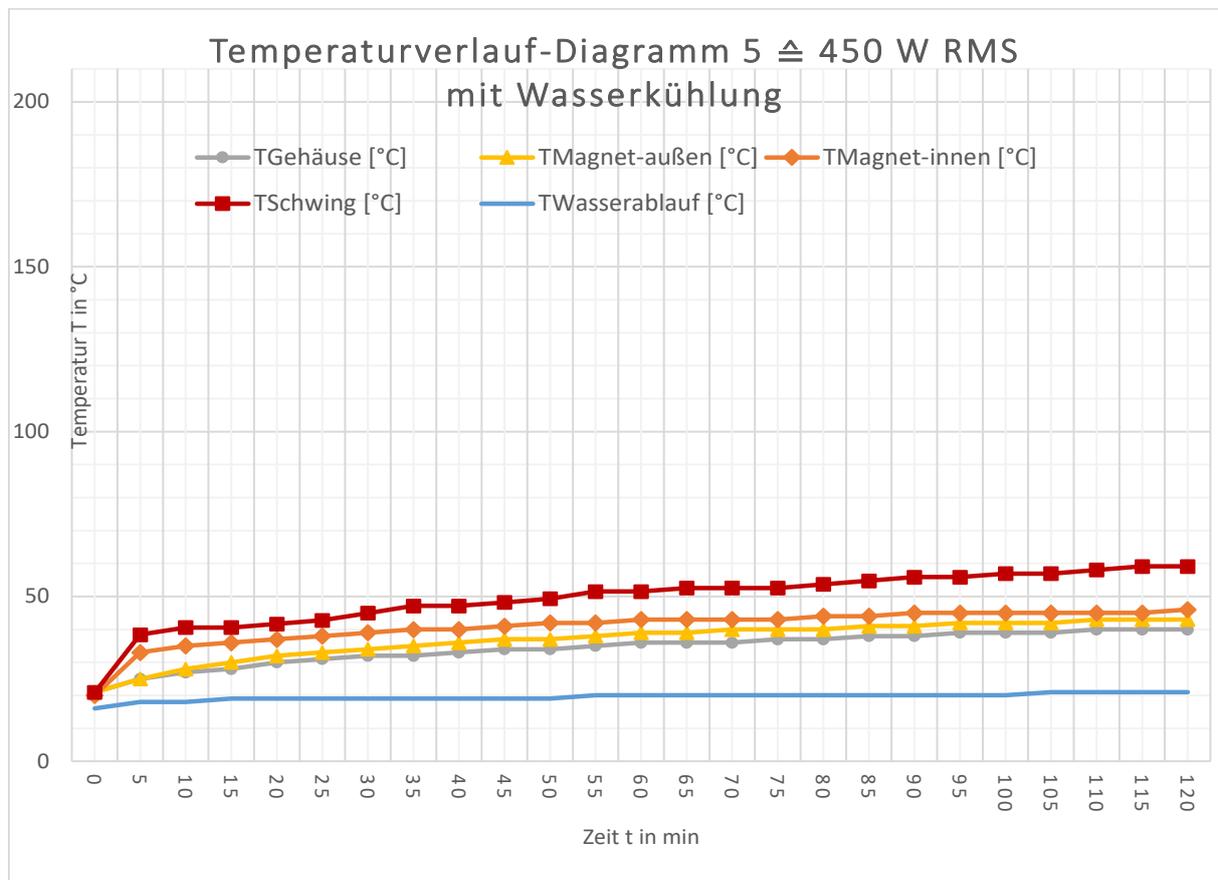


Abbildung 23: Temperaturverlauf-Diagramm 5 $\cong 450$ W RMS mit Wasserkühlung [Eigene Darstellung]. Ergebnis der fünften Temperaturmessung. $T_{\text{Gehäuse}}$ – Gehäusetemperatur, $T_{\text{Magnet-außen}}$ – Magnetaußentemperatur, $T_{\text{Magnet-innen}}$ – Magnetinnentemperatur, T_{Schwing} – Schwingspulentemperatur, $T_{\text{Wasserablauf}}$ – Wasserablaufemperatur.

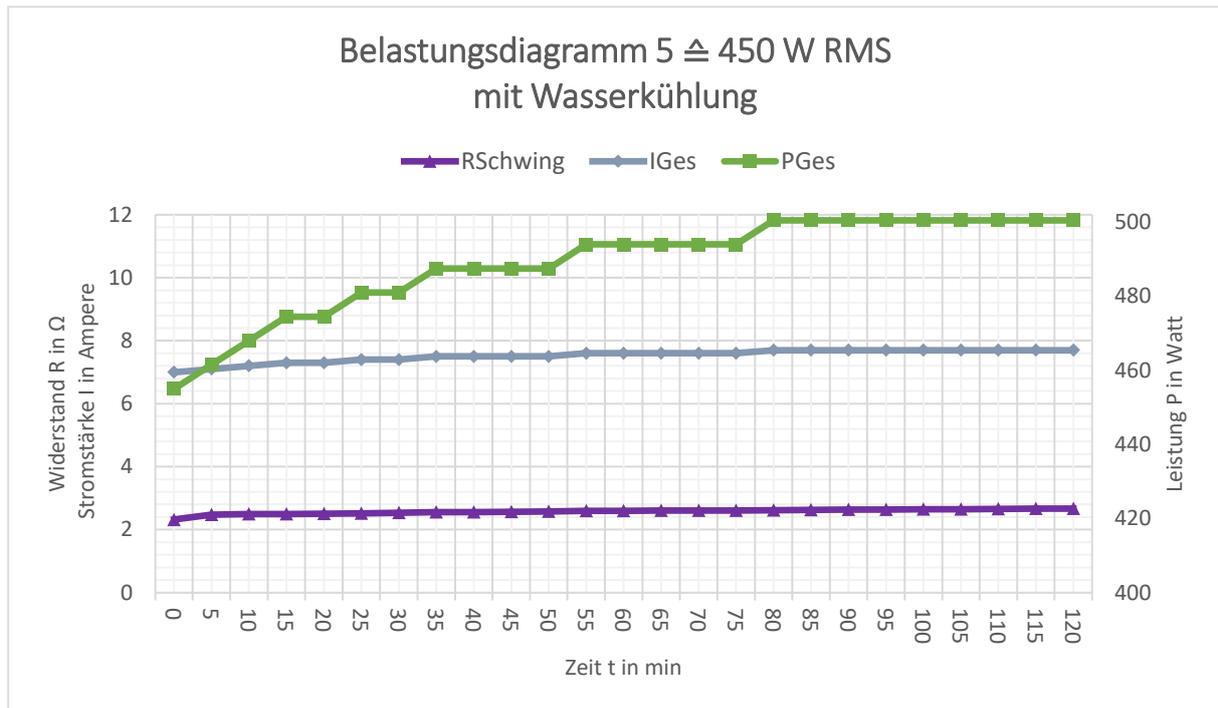


Abbildung 24: Belastungsdiagramm 5 \triangleq 450 W RMS mit Wasserkühlung [Eigene Darstellung] – zugehörig zum Temperaturverlauf-Diagramm 5. RSchwing – Schwingspulenwiderstand, IGes – Endstufenausgangsstromstärke, PGes – Endstufenausgangsleistung.

4.2.1.6 Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 6

Die unabhängigen Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 6 sind in Tabelle 10 beschrieben. Die Endstufenausgangsleistung betrug näherungsweise 900 Watt RMS, die Endstufenausgangsspannung lag bei 90 Volt und das Signal war ein Sinus mit einer Frequenz von 70 Hertz. Der Treiber wurde mittels Wasserkühlung aktiv gekühlt. Die Wasserdurchflussmenge lag bei 0,71 l/min und die Wasserzulauftemperatur bei 16 °C. Der Widerstand-Korrekturfaktor wurde mit 0,19 Ohm ermittelt. Der Temperaturkoeffizient von Kupfer betrug 0,00393 und der Widerstand- R_{22} 2,33 Ohm. Das Ergebnis der Temperaturverläufe aus der sechsten Temperaturuntersuchung wird in Abbildung 25 mittels Liniendiagramm präsentiert. Das zugehörige Belastungsdiagramm 6 wird in Abbildung 26 dargestellt. Die Zeitachse ist kongruent mit der aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 6. Die dazugehörigen konkreten Extrema-Kennwerte befinden sich im späteren Verlauf unter 4.2.3.6.

Tabelle 10: Unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 6 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 6					
PGes [W RMS]:	\triangleq 900	Wasserkühlung:	Ja	R22 [Ω]:	2,33
UGes [V]:	90	QWasser [l/min]:	0,71	Rkorrektur [Ω]:	0,19
Signal:	Sinus	TWasserzulauf [$^{\circ}$ C]:	16	α_{Cu}	0,00393
fSignal [Hz]:	70				

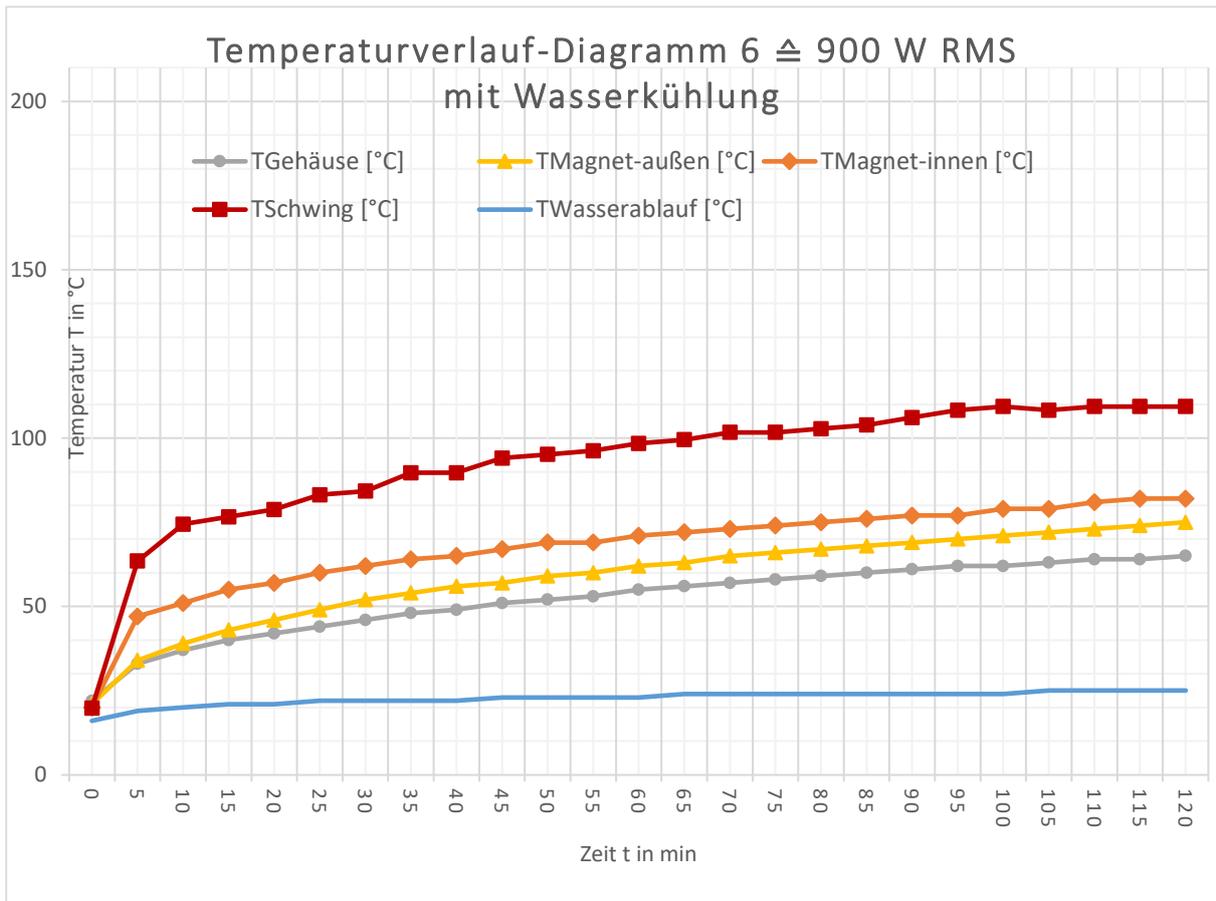


Abbildung 25: Temperaturverlauf-Diagramm 6 \approx 900 W RMS mit Wasserkühlung [Eigene Darstellung]. Ergebnis der sechsten Temperaturmessung. TGehäuse – Gehäusetemperatur, TMagnet-außen – Magnetaußentemperatur, TMagnet-innen – Magnetinnentemperatur, TSchwing – Schwingspulentemperatur, TWasserablauf – Wasserablaufftemperatur.

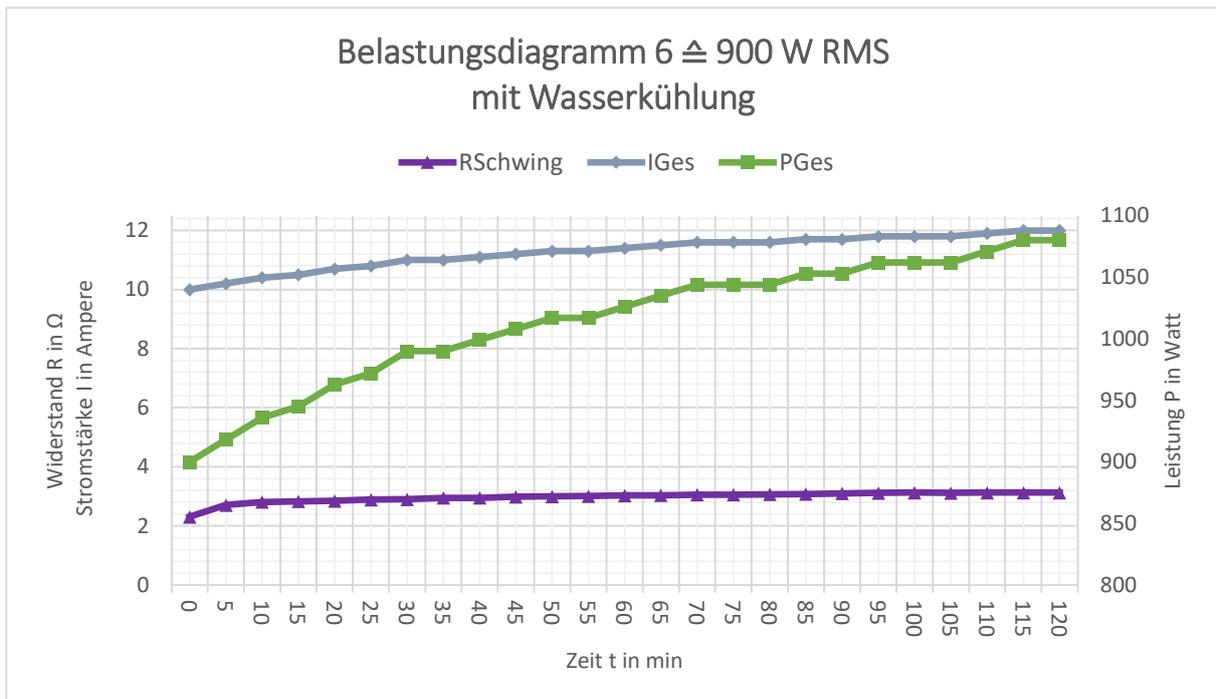


Abbildung 26: Belastungsdiagramm 6 \approx 900 W RMS mit Wasserkühlung [Eigene Darstellung] – zugehörig zum Temperaturverlauf-Diagramm 6. RSchwing – Schwingspulenwiderstand, IGes – Endstufenausgangsstromstärke, PGes – Endstufenausgangsleistung.

4.2.2 Vergleich Temperaturverlauf-Diagramme

Die folgenden Diagramme zeigen einen direkten Vergleich (Vgl.) der jeweiligen Temperaturverläufe mit aktiver und passiver Kühlung bei näherungsweise gleicher Belastung. Die Wasserablauftemperatur wurde im Folgenden nicht mitberücksichtigt, da sich der Verlauf nicht vergleichen lässt.

4.2.2.1 Vergleich Temperaturverlauf-Diagramm 1 und 4

In Abbildung 27 wird der direkte Vergleich zwischen dem passiv gekühlten Temperaturverlauf-Diagramm 1 (in Rot) und dem aktiv gekühlten Temperaturverlauf-Diagramm 4 (in Blau) dargestellt. Die Endstufenausgangsleistung betrug jeweils näherungsweise 225 Watt RMS.

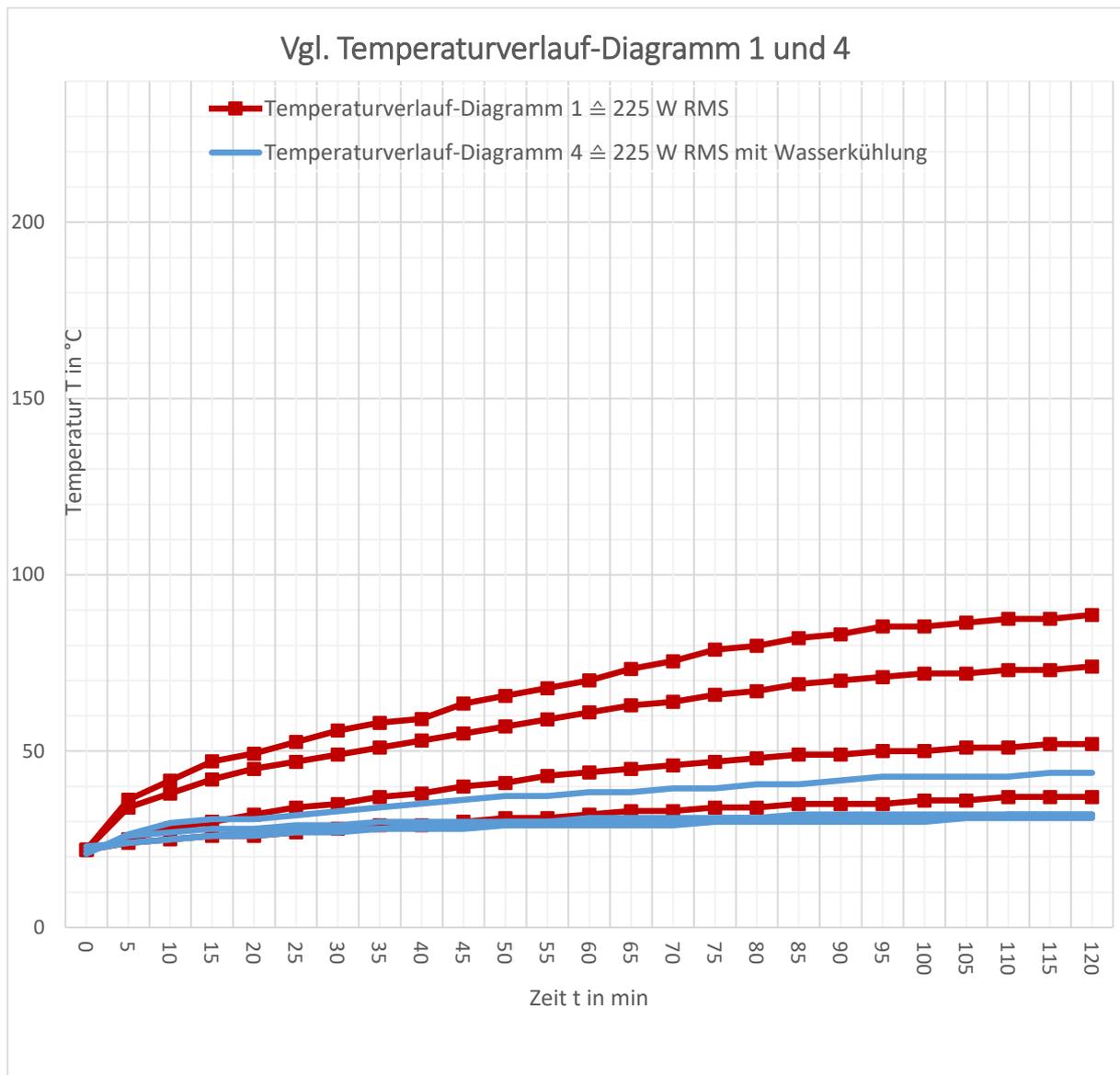


Abbildung 27: Vgl. Temperaturverlauf-Diagramm 1 und 4 [Eigene Darstellung]. In Rot die Temperaturverläufe aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 1. In Blau die Temperaturverläufe aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 4. Die Wasserablauftemperatur wurde nicht mitberücksichtigt.

4.2.2.2 Vergleich Temperaturverlauf-Diagramm 2 und 5

In Abbildung 28 wird der direkte Vergleich zwischen dem passiv gekühlten Temperaturverlauf-Diagramm 2 (in Rot) und dem aktiv gekühlten Temperaturverlauf-Diagramm 5 (in Blau) dargestellt. Die Endstufenausgangsleistung betrug jeweils näherungsweise 450 Watt RMS.

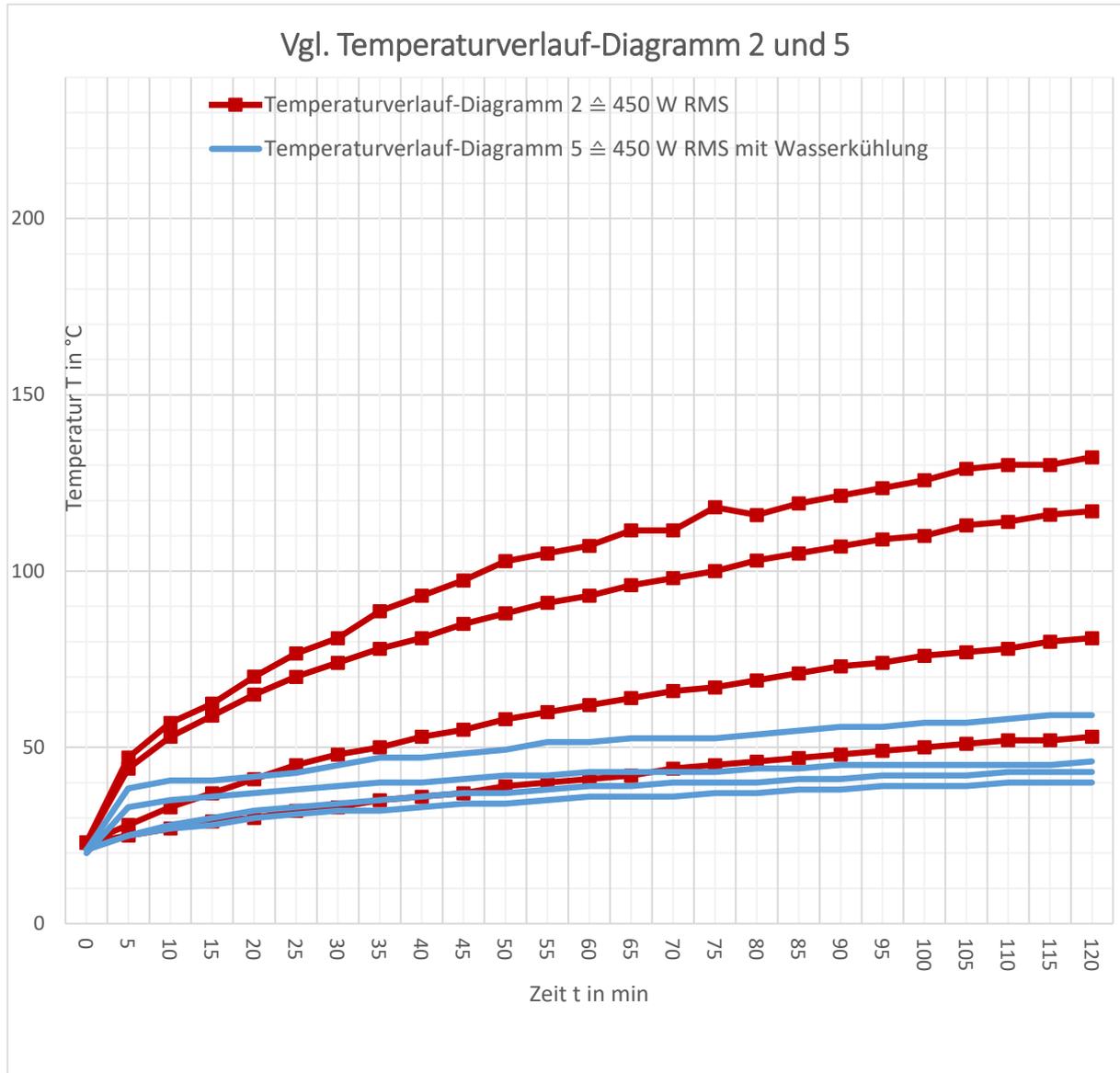


Abbildung 28: Vgl. Temperaturverlauf-Diagramm 2 und 5 [Eigene Darstellung]. In Rot die Temperaturverläufe aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 2. In Blau die Temperaturverläufe aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 5. Die Wasserablauftemperatur wurde nicht mitberücksichtigt.

4.2.2.3 Vergleich Temperaturverlauf-Diagramm 3 und 6

In Abbildung 29 wird der direkte Vergleich zwischen dem passiv gekühlten Temperaturverlauf-Diagramm 3 (in Rot) und dem aktiv gekühlten Temperaturverlauf-Diagramm 6 (in Blau) dargestellt. Die Endstufenausgangsleistung betrug jeweils näherungsweise 900 Watt RMS.

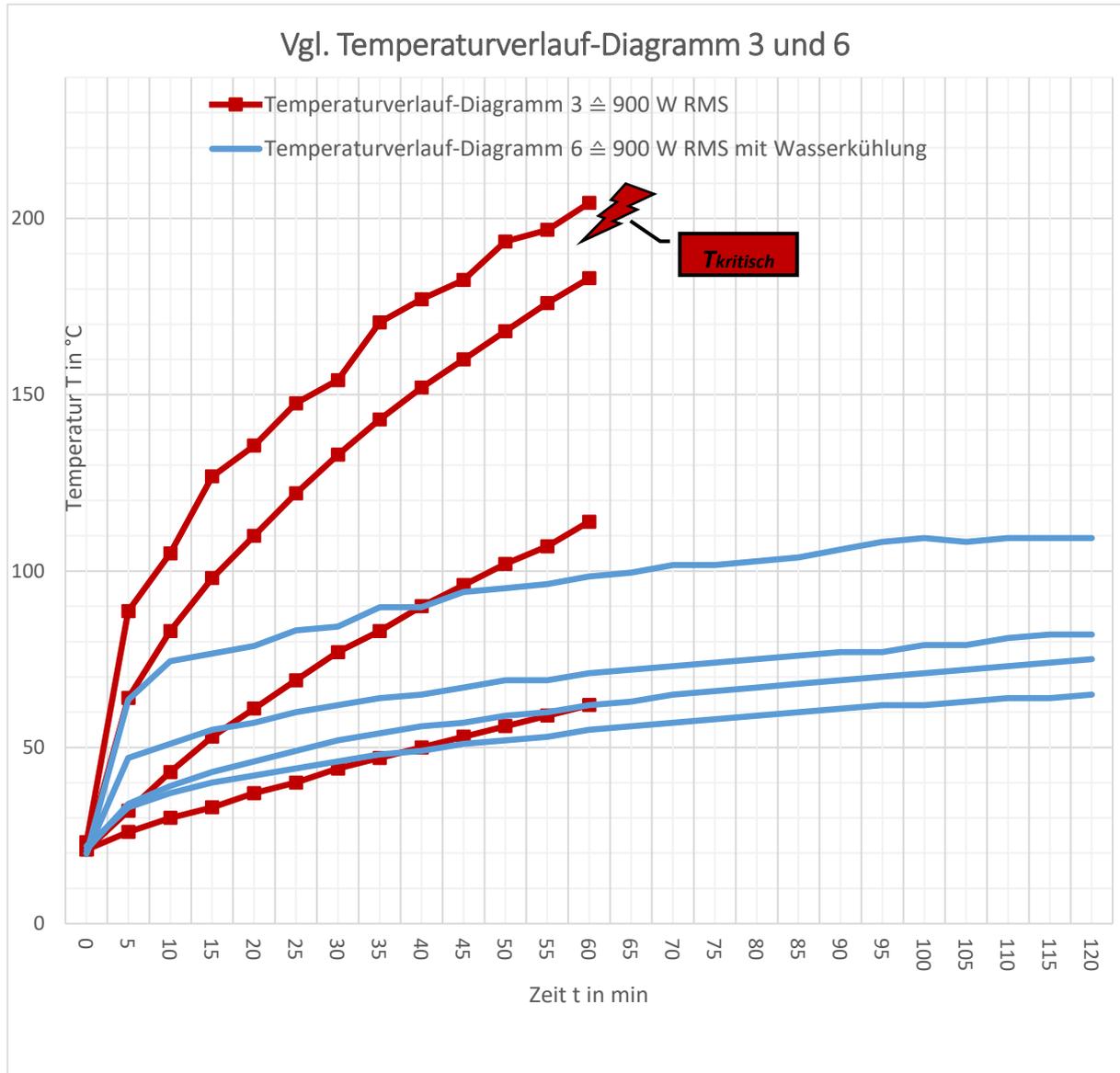


Abbildung 29: Vgl. Temperaturverlauf-Diagramm 3 und 6 [Eigene Darstellung]. In Rot die Temperaturverläufe aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 3. In Blau die Temperaturverläufe aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 6. Die Wasserablauftemperatur wurde nicht mitberücksichtigt.

4.2.3 Extrema-Kennwerte

Die Extrema-Kennwerte bilden das Grenzlastverhalten am deutlichsten ab und beinhalten für die anschließende Diskussion die relevantesten Informationen. Die folgenden Kennwerte der Tabelle 11 bis Tabelle 16 werden daher mittels einer Extremwertbetrachtung ermittelt. Einerseits werden hierzu die Maximal- und Minimal-Temperaturen bzw. -Belastungen zu Beginn ($t = 0$) und zum Ende ($t = 120$) der Messung betrachtet. Andererseits werden die maximalen Temperatur- und Belastungsdifferenzen zwischen Beginn und Ende der Messung ($\Delta t = 120$) ermittelt. Die jeweiligen Informationen sind im Kürzel entsprechend gekennzeichnet: z.B. „ $T_{\text{Schwing}(120)U1}$ “ beschreibt den Kennwert der Schwingspulentemperatur (T_{Schwing}) nach 120 Minuten ((120)) aus der Temperaturuntersuchung 1 ($U1$). Die Minimal-Werte der Temperaturverlauf-Diagramme bei $t = 0$ sind alle dieselben (± 2 °C) und werden daher nicht jedes Mal erneut aufgelistet:

$$T_{\text{Gehäuse}}, T_{\text{Magnet-außen}}, T_{\text{Magnet-innen}}, T_{\text{Schwing}} = 22 \text{ °C}$$

$$T_{\text{Wasserzulauf}} = 16 \text{ °C}$$

Um einem eventuellen Missverständnis bei der Betrachtung der Belastungskennwerte vorzubeugen, wird auf den folgenden Sachverhalt hingewiesen:

$$R_{\text{Schwing}} \neq R_{\text{Ges}} \rightarrow R_{\text{Schwing}} \neq \frac{U_{\text{Ges}}}{I_{\text{Ges}}}$$

4.2.3.1 Extrema-Kennwerte der Temperaturuntersuchung 1

Die Tabelle 11 enthält die Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 1.

Tabelle 11: Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 1 [Eigene Darstellung]. Temperatur T [°C], Widerstand R [Ω], Stromstärke I [A], Leistung P [W RMS].

Maximal-Temperatur	T [°C]	Maximal-Temperaturdifferenz	T [°C]
$T_{\text{Schwing}(120)U1}$	89	$T_{\text{Schwing}(\Delta 120)U1}$	67
$T_{\text{Magnet-innen}(120)U1}$	74	$T_{\text{Magnet-innen}(\Delta 120)U1}$	52
$T_{\text{Magnet-außen}(120)U1}$	52	$T_{\text{Magnet-außen}(\Delta 120)U1}$	30
$T_{\text{Gehäuse}(120)U1}$	37	$T_{\text{Gehäuse}(\Delta 120)U1}$	15
Minimal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]	Maximal-Belastungsdifferenz	R[Ω]; I[A]; P[W]
$R_{\text{Schwing}(0)U1}$	2,33	$R_{\text{Schwing}(\Delta 120)U1}$	0,61
$I_{\text{Ges}(0)U1}$	5	$I_{\text{Ges}(\Delta 120)U1}$	0,9
$P_{\text{Ges}(0)U1}$	223	$P_{\text{Ges}(\Delta 120)U1}$	40
Maximal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]		
$R_{\text{Schwing}(120)U1}$	2,94		
$I_{\text{Ges}(120)U1}$	5,9		
$P_{\text{Ges}(120)U1}$	263		

4.2.3.2 Extrema-Kennwerte der Temperaturuntersuchung 2

Die Tabelle 12 enthält die Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 2.

Tabelle 12: Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 2 [Eigene Darstellung]. Temperatur T [°C], Widerstand R [Ω], Stromstärke I [A], Leistung P [W RMS].

Maximal-Temperatur	T [°C]	Maximal-Temperaturdifferenz	T [°C]
$T_{Schwing(120)U2}$	132	$T_{Schwing(\Delta 120)U2}$	109
$T_{Magnet-innen(120)U2}$	117	$T_{Magnet-innen(\Delta 120)U2}$	94
$T_{Magnet-au\ss en(120)U2}$	81	$T_{Magnet-au\ss en(\Delta 120)U2}$	58
$T_{Geh\u00e4use(120)U2}$	53	$T_{Geh\u00e4use(\Delta 120)U2}$	30
Minimal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]	Maximal-Belastungsdifferenz	R[Ω]; I[A]; P[W]
$R_{Schwing(0)U2}$	2,34	$R_{Schwing(\Delta 120)U2}$	1
$I_{Ges(0)U2}$	7,4	$I_{Ges(\Delta 120)U2}$	0,9
$P_{Ges(0)U2}$	444	$P_{Ges(\Delta 120)U2}$	54
Maximal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]		
$R_{Schwing(120)U2}$	3,34		
$I_{Ges(120)U2}$	8,3		
$P_{Ges(120)U2}$	498		

4.2.3.3 Extrema-Kennwerte der Temperaturuntersuchung 3

Die Tabelle 13 enthält die Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 3.

Tabelle 13: Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 3 [Eigene Darstellung]. Temperatur T [°C], Widerstand R [Ω], Stromstärke I [A], Leistung P [W RMS].

Maximal-Temperatur	T [°C]	Maximal-Temperaturdifferenz	T [°C]
$T_{Schwing(60)U3}$	204	$T_{Schwing(\Delta 60)U3}$	181
$T_{Magnet-innen(60)U3}$	183	$T_{Magnet-innen(\Delta 60)U3}$	162
$T_{Magnet-au\ss en(60)U3}$	114	$T_{Magnet-au\ss en(\Delta 60)U3}$	93
$T_{Geh\u00e4use(60)U3}$	62	$T_{Geh\u00e4use(\Delta 60)U3}$	41
Minimal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]	Maximal-Belastungsdifferenz	R[Ω]; I[A]; P[W]
$R_{Schwing(0)U3}$	2,34	$R_{Schwing(\Delta 60)U3}$	1,66
$I_{Ges(0)U3}$	10,9	$I_{Ges(\Delta 60)U3}$	0,4
$P_{Ges(0)U3}$	894	$P_{Ges(\Delta 60)U3}$	33
Maximal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]		
$R_{Schwing(60)U3}$	4		
$I_{Ges(60)U3}$	11,3		
$P_{Ges(60)U3}$	927		

4.2.3.4 Extrema-Kennwerte der Temperaturuntersuchung 4

Die Tabelle 14 enthält die Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 4.

Tabelle 14: Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 4 [Eigene Darstellung]. Temperatur T [°C], Widerstand R [Ω], Stromstärke I [A], Leistung P [W RMS].

Maximal-Temperatur	T [°C]	Maximal-Temperaturdifferenz	T [°C]
$T_{Schwing(120)U4}$	44	$T_{Schwing(\Delta 120)U4}$	23
$T_{Magnet-innen(120)U4}$	32	$T_{Magnet-innen(\Delta 120)U4}$	11
$T_{Magnet-au\beta en(120)U4}$	32	$T_{Magnet-au\beta en(\Delta 120)U4}$	10
$T_{Geh\u00e4use(120)U4}$	31	$T_{Geh\u00e4use(\Delta 120)U4}$	8
$T_{Wasserablauf(120)U4}$	19	$T_{Wasserablauf(\Delta 120)U4}$	3
Minimal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]	Maximal-Belastungsdifferenz	R[Ω]; I[A]; P[W]
$R_{Schwing(0)U4}$	2,32	$R_{Schwing(\Delta 120)U4}$	0,21
$I_{Ges(0)U4}$	4,9	$I_{Ges(\Delta 120)U4}$	0,3
$P_{Ges(0)U4}$	225	$P_{Ges(\Delta 120)U4}$	14
Maximal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]		
$R_{Schwing(120)U4}$	2,53		
$I_{Ges(120)U4}$	5,2		
$P_{Ges(120)U4}$	239		

4.2.3.5 Extrema-Kennwerte der Temperaturuntersuchung 5

Die Tabelle 15 enthält die Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 5.

Tabelle 15: Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 5 [Eigene Darstellung]. Temperatur T [°C], Widerstand R [Ω], Stromstärke I [A], Leistung P [W RMS].

Maximal-Temperatur	T [°C]	Maximal-Temperaturdifferenz	T [°C]
$T_{Schwing(120)U5}$	59	$T_{Schwing(\Delta 120)U5}$	38
$T_{Magnet-innen(120)U5}$	46	$T_{Magnet-innen(\Delta 120)U5}$	26
$T_{Magnet-au\beta en(120)U5}$	43	$T_{Magnet-au\beta en(\Delta 120)U5}$	22
$T_{Geh\u00e4use(120)U5}$	40	$T_{Geh\u00e4use(\Delta 120)U5}$	19
$T_{Wasserablauf(120)U5}$	21	$T_{Wasserablauf(\Delta 120)U5}$	5
Minimal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]	Maximal-Belastungsdifferenz	R[Ω]; I[A]; P[W]
$R_{Schwing(0)U5}$	2,32	$R_{Schwing(\Delta 120)U5}$	0,35
$I_{Ges(0)U5}$	7	$I_{Ges(\Delta 120)U5}$	0,7
$P_{Ges(0)U5}$	455	$P_{Ges(\Delta 120)U5}$	46
Maximal-Belastung	R[Ω]; I[A]; P[W]		
$R_{Schwing(120)U5}$	2,67		
$I_{Ges(120)U5}$	7,7		
$P_{Ges(120)U5}$	501		

4.2.3.6 Extrema-Kennwerte der Temperaturuntersuchung 6

Die Tabelle 16 enthält die Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 6.

Tabelle 16: Extrema-Kennwerte von Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 6 [Eigene Darstellung]. Temperatur T [$^{\circ}\text{C}$], Widerstand R [Ω], Stromstärke I [A], Leistung P [W RMS].

Maximal-Temperatur	T [$^{\circ}\text{C}$]	Maximal-Temperaturdifferenz	T [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{\text{Schwing}(120)\text{U}6}$	109	$T_{\text{Schwing}(\Delta 120)\text{U}6}$	89
$T_{\text{Magnet-innen}(120)\text{U}6}$	82	$T_{\text{Magnet-innen}(\Delta 120)\text{U}6}$	62
$T_{\text{Magnet-au\ss en}(120)\text{U}6}$	75	$T_{\text{Magnet-au\ss en}(\Delta 120)\text{U}6}$	54
$T_{\text{Geh\u00e4use}(120)\text{U}6}$	65	$T_{\text{Geh\u00e4use}(\Delta 120)\text{U}6}$	43
$T_{\text{Wasserablauf}(120)\text{U}6}$	25	$T_{\text{Wasserablauf}(\Delta 120)\text{U}6}$	9
Minimal-Belastung	R [Ω]; I [A]; P [W]	Maximal-Belastungsdifferenz	R [Ω]; I [A]; P [W]
$R_{\text{Schwing}(0)\text{U}6}$	2,31	$R_{\text{Schwing}(\Delta 120)\text{U}6}$	0,82
$I_{\text{Ges}(0)\text{U}6}$	10	$I_{\text{Ges}(\Delta 120)\text{U}6}$	2
$P_{\text{Ges}(0)\text{U}6}$	900	$P_{\text{Ges}(\Delta 120)\text{U}6}$	180
Maximal-Belastung	R [Ω]; I [A]; P [W]		
$R_{\text{Schwing}(120)\text{U}6}$	3,13		
$I_{\text{Ges}(120)\text{U}6}$	12		
$P_{\text{Ges}(120)\text{U}6}$	1080		

5 Diskussion

5.1 Zusammenhang der Einflussfaktoren

Die Frage, ob eine Wasserkühlung ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung von Tiefton-Hochleistungslautsprechern sein kann, ist nach den Untersuchungsergebnissen von mehreren Faktoren abhängig. Es besteht der folgende, in Abbildung 30 dargestellte Zusammenhang – (Grün) Einflussfaktoren für die Erfüllung der Optimierung, (Orange) Einflussfaktoren für die Nichterfüllung der Optimierung, (Grau) Titel auf die Einfluss genommen wird. Je größer die Kühlwirkung ist, desto geringer ist die Lautsprechertemperatur. Und je geringer die Lautsprechertemperatur ist, desto effizienter kann der Treiber konstruiert werden und umso höher steigt die thermische Belastbarkeit. D.h. also, je größer die Kühlwirkung, desto größer die Optimierung. Eine Wasserkühlung kann die Kühlwirkung deutlich vergrößern, weil sie effizienter als eine Passivkühlung ist. Demnach ist eine Wasserkühlung ein Mittel zur Optimierung. Inwieweit dieses Mittel geeignet ist, hängt vom Temperaturanstieg bzw. vom Kühlpotential ab. Je größer der Temperaturanstieg bzw. das Kühlpotential, desto größer die Kühlwirkung und ein umso geeigneteres Mittel ist die Wasserkühlung. Folglich ist also der Temperaturanstieg das wesentliche Kriterium, ob eine Wasserkühlung ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung sein kann. Der Temperaturanstieg hängt laut Untersuchungsergebnissen im Wesentlichen von der Signaldauer und dem Crest-Faktor bzw. Effektivwert ab. Im Folgenden werden daher die Ergebnisse mit Schwerpunkt auf die genannten Faktoren ausgewertet. Hier besteht auch der Bezug zum Teilziel, das in der Einleitung aufgestellt wurde: „...den thermischen Einfluss der Signaldauer, des Crest-Faktors, der Belastung und der Wasserkühlung auf den zu untersuchenden Tiefton-Hochleistungslautsprecher zu ermitteln“. Zudem wird anhand der Ergebnisse die Hypothese bestätigt, dass überhaupt ein Optimierungsbedarf für die vorhandene passive Kühlung besteht.

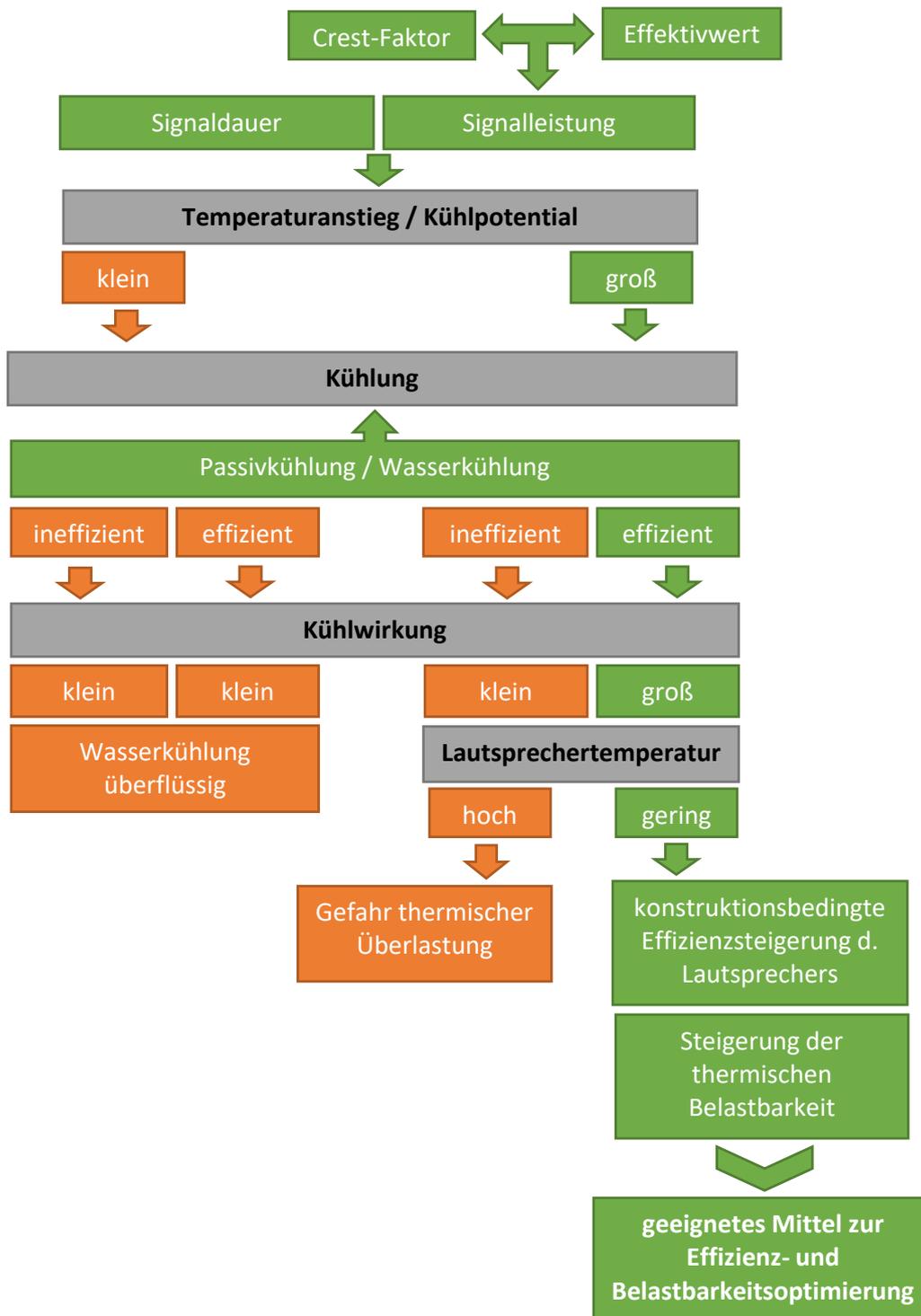


Abbildung 30: Zusammenhang der Einflussfaktoren in Bezug auf die Fragestellung, ob eine Wasserkühlung ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung sein kann [Eigene Darstellung]. (Grün) Einflussfaktoren für die Erfüllung der Optimierung. (Orange) Einflussfaktoren für die Nichterfüllung der Optimierung. (Grau) Hierauf wird Einfluss genommen.

5.2 Bestätigung der Hypothese

Die Hypothese, dass überhaupt ein Optimierungsbedarf für die vorhandene passive Kühlung besteht, wurde in den Temperaturuntersuchungen bestätigt. Die Temperaturverläufe ähneln dem typischen Verlauf einer Wurzelfunktion, d.h. sie weisen zu Beginn einen streng wachsenden Anstieg auf, der nach und nach abflacht. Der jeweilige Temperaturanstieg variiert je nach Belastung und Art der Kühlung. Zum einen ist festzustellen, dass sich die Temperaturverläufe bei gleicher Kühlung und unterschiedlichen Belastungen im Grenzlastbetrieb gravierend voneinander unterscheiden. So besteht z.B. eine Schwingspulen-Temperaturdifferenz zwischen Belastung 1 und Belastung 3 nach 60 Minuten von 134 °C. Der Einfluss der Belastung auf die Temperatur ist demnach relevant. Zum anderen ist festzustellen, dass sich die Temperaturverläufe bei gleicher Belastung und unterschiedlicher Kühlung im Grenzlastbetrieb ebenfalls gravierend voneinander unterscheiden. So besteht z.B. eine Schwingspulen-Temperaturdifferenz zwischen Belastung 3 mit und Belastung 3 ohne Wasserkühlung nach 60 Minuten von 106 °C. Der Einfluss der Wasserkühlung ist demnach ebenfalls relevant. Diese Umstände sind die Grundvoraussetzung für den Bedarf einer Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung und untermauern die Relevanz der Fragestellung. Wären die genannten Einflüsse aufgrund sehr geringer Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen vernachlässigbar gewesen, wäre ebenfalls der Bedarf vernachlässigbar gewesen.

5.3 Der Temperaturanstieg als wesentliches Optimierungskriterium

Aus den Untersuchungsergebnissen geht hervor, dass der Temperaturanstieg ein wesentliches Optimierungskriterium ist. Bei langer Signaldauer, niedrigem Crest-Faktor und hoher elektrischer Belastung ist der Temperaturanstieg am größten. Das Temperaturverlauf-Diagramm 3 und die Maximal-Temperaturdifferenz $T_{schwing(\Delta 60)U3} = 181\text{ °C}$ machen dies deutlich. Unter Berücksichtigung der oben erarbeiteten Zusammenhänge ist hier also eine Wasserkühlung ein sehr geeignetes Mittel zur Optimierung. Eine kurze Signaldauer, ein hoher Crest-Faktor und eine niedrige elektrische Belastung hingegen erzeugen einen sehr geringen Temperaturanstieg. Dies geht aus dem Temperaturverlauf-Diagramm 1 und der dazugehörigen Maximal-Temperaturdifferenz $T_{schwing(\Delta 120)U1} = 67\text{ °C}$ hervor. Hier ist eine Wasserkühlung also kein geeignetes Mittel zur Optimierung.

Die Signaldauer beeinflusst den Temperaturanstieg offensichtlich mit am stärksten. So ist den Temperaturuntersuchungen ohne Wasserkühlung zu entnehmen, dass es ca. zwei Stunden dauert, bis der Lautsprecher ansatzweise in die Sättigung gelangt und die Maximal-Temperaturen erreicht werden (siehe Abbildung 15, Abbildung 17 und Abbildung 19). Vorher macht es den Anschein, als würden sich die Temperaturen gegenseitig verstärken.

Mit Wasserkühlung hingegen erreicht der Lautsprecher bereits nach ca. zehn Minuten ansatzweise die Sättigung. Im folgenden Zeitraum schafft es die Wasserkühlung, dem System die thermische Energie zu entziehen und einen relevanten Temperaturanstieg bzw. ein Hochschaukeln zu verhindern (siehe Abbildung 21, Abbildung 23 und Abbildung 25). Demnach ist also eine Wasserkühlung umso geeigneter, je größer die Zeiträume des Grenzlastbetriebs sind.

Neben der Signaldauer ist der Crest-Faktor ebenfalls ausschlaggebend für den Temperaturanstieg, weil von ihm der Effektivwert bzw. die Signalleistung abhängt – 225, 450, 900 Watt RMS (siehe 3.2.6). Bei Musiksignalen mit Crest-Faktoren ≤ 9 dB und einem hohen Effektivwert besteht bereits nach 60 Minuten ohne aktive Kühlung die Gefahr einer thermischen Überlastung (siehe Abbildung 19 und Tabelle 13). Bei Musiksignalen mit Crest-Faktoren > 9 dB und einem kleinen Effektivwert hingegen erscheint die mechanische Überlastung deutlich wahrscheinlicher als eine thermische. Demnach ist also eine Wasserkühlung umso geeigneter, je geringer der Crest-Faktor des Musiksignals wird bzw. je größer der Effektivwert wird. Bei ≤ 9 dB Crest erscheint eine Wasserkühlung am geeignetsten.

5.4 Die Effizienz der passiven und aktiven Kühlung

Eine Kühlung muss möglichst effizient sein, um einen großen Temperaturanstieg zu bewältigen. Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass eine Wasserkühlung deutlich effizienter als eine passive Kühlung sein kann. Speziell die Vgl. Temperaturverlauf-Diagramme (siehe 4.2.2) zeigen dies sehr deutlich. Hier besteht eine deutliche Abweichung zwischen den passiv gekühlten roten Verläufen und den aktiv gekühlten blauen Verläufen. Im Vgl. Temperaturverlauf-Diagramm 3 und 6 ist diese Abweichung am größten. Ohne die effiziente Wirkung der Wasserkühlung wäre eine Messung über zwei Stunden aufgrund der kritischen Schwingpulventemperatur nicht mal möglich gewesen. Unter Berücksichtigung der oben genannten Zusammenhänge stellt eine Wasserkühlung demnach ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung dar.

5.5 Teilziel eines effektiv gestalteten Funktionsprinzips

Ein Teilziel war, eine Wasserkühlung mit einem effektiv gestalteten Funktionsprinzip zu entwickeln und den erwarteten Anstieg der Schwingpulventemperatur im Grenzlastbereich auf ein Minimum von $\Delta T_{Schwing} \leq 50$ °C zu reduzieren. Dieses Kriterium wurde in der Temperaturuntersuchung 4 und 5 erfüllt. So beträgt hier die Maximal-Temperaturdifferenz $T_{Schwing(\Delta 120)U4} = 23$ °C ≤ 50 °C und $T_{Schwing(\Delta 120)U5} = 38$ °C ≤ 50 °C. In der Temperaturuntersuchung 6 wurde das Kriterium nicht erfüllt, $T_{Schwing(\Delta 120)U6} = 89$ °C ≥ 50 °C.

Dennoch konnte hier die Wasserkühlung das Erreichen einer kritischen Temperatur verhindern, wie es bereits bei gleicher Belastung und ohne Wasserkühlung nach 60 Minuten der Fall war, $T_{Schwing(60)U3} = 204 \text{ °C} \geq T_{kritisch}$. Zudem beträgt die gekühlte Schwingspulentemperatur in etwa die Hälfte der passiv gekühlten Variante. Dies geht aus dem Vergleich der Temperaturverlauf-Diagramme hervor:

$$T_{Schwing(\Delta 120)U4} \cong \frac{1}{2} * T_{Schwing(\Delta 120)U1} \rightarrow 44 \text{ °C} \cong \frac{1}{2} * 89 \text{ °C}$$

$$T_{Schwing(\Delta 120)U5} \cong \frac{1}{2} * T_{Schwing(\Delta 120)U2} \rightarrow 59 \text{ °C} \cong \frac{1}{2} * 132 \text{ °C}$$

$$T_{Schwing(\Delta 60)U6} \cong \frac{1}{2} * T_{Schwing(\Delta 60)U3} \rightarrow 98 \text{ °C} \cong \frac{1}{2} * 204 \text{ °C}$$

Das Funktionsprinzip ist demzufolge trotz Nichterfüllung des Kriteriums effektiv gestaltet.

5.6 Die Powercompression anders als erwartet

Die Analyse der Belastungsdiagramme ergab, dass der Effekt der Powercompression, der in den theoretischen Grundlagen unter 2.1.6 kurz erläutert wurde, nicht wie angenommen bestätigt werden konnte. Das Belastungsdiagramm und die Extrema-Kennwerte verzeichnen zwar einen Anstieg des Schwingspulenwiderstandes jedoch keinen Abfall der Endstufenausgangsleistung. Im Gegenteil, die Endstufenausgangsleistung und Endstufenausgangsstromstärke verzeichnen einen unerwarteten, markanten Anstieg. Stichprobenmessungen ergaben, dass die Endstufenausgangsspannung wie erwartet konstant war. Demnach beruht der Leistungsanstieg ausschließlich auf dem Anstieg der Stromstärke. Die folgenden Extrema-Kennwerte bestätigen den genannten Sachverhalt.

Anstieg Schwingspulenwiderstand:

$$R_{Schwing(\Delta 120)U1} = 0,61 \text{ } \Omega; R_{Schwing(\Delta 120)U2} = 1,00 \text{ } \Omega; R_{Schwing(\Delta 60)U3} = 1,66 \text{ } \Omega$$

$$R_{Schwing(\Delta 120)U4} = 0,21 \text{ } \Omega; R_{Schwing(\Delta 120)U5} = 0,35 \text{ } \Omega; R_{Schwing(\Delta 120)U6} = 0,82 \text{ } \Omega$$

Anstieg Endstufenausgangsleistung (unerwartet):

$$P_{Ges(\Delta 120)U1} = 40 \text{ W RMS}; P_{Ges(\Delta 120)U2} = 54 \text{ W RMS}; P_{Ges(\Delta 60)U3} = 33 \text{ W RMS}$$

$$P_{Ges(\Delta 120)U4} = 14 \text{ W RMS}; P_{Ges(\Delta 120)U5} = 46 \text{ W RMS}; P_{Ges(\Delta 120)U6} = 180 \text{ W RMS}$$

Anstieg Endstufenausgangsstromstärke (unerwartet):

$$I_{Ges(\Delta 120)U1} = 0,9 \text{ A}; I_{Ges(\Delta 120)U2} = 0,9 \text{ A}; I_{Ges(\Delta 60)U3} = 0,4 \text{ A}$$

$$I_{Ges(\Delta 120)U4} = 0,3 \text{ A}; I_{Ges(\Delta 120)U5} = 0,7 \text{ A}; I_{Ges(\Delta 120)U6} = 0,2 \text{ A}$$

Diskussion des Sachverhalts

Im Folgenden werden für das oben beschriebene Phänomen Erklärungen diskutiert. Diese sind nicht wissenschaftlich belegt, sondern reine Mutmaßung.

Erklärung 1 – Das Messgerät als Fehlerquelle:

Da sämtliche Messgeräte ausgiebig getestet wurden, erscheint diese Erklärung als äußerst unwahrscheinlich. Insbesondere das Zangenamperemeter wurde tiefergehend geprüft und hat im Rahmen seiner Toleranz zuverlässige Werte geliefert.

Erklärung 2 – Der Mensch als Fehlerquelle:

Alle Messungen zeigten dasselbe Phänomen, daher ist ein falsches Ablesen der Werte o.ä. auszuschließen.

Erklärung 3 – eine temperaturabhängige Verschiebung der Lautsprecherimpedanz:

Angenommen, der Temperaturanstieg würde die Lautsprecherimpedanz verändern, dann würde dies ebenfalls Auswirkungen auf die Endstufenausgangsstromstärke haben. Eine Theorie, wie die Temperatur im Lautsprecher Einfluss auf den Impedanzverlauf nehmen könnte ist folgende. Durch den Temperaturanstieg erhitzt sich die Luft im Subwoofer-Gehäuse und verkleinert dessen Dichte. Somit verkleinert sich das theoretische Gehäuse-Volumen, das wiederum ein wesentlicher Einflussfaktor für die Tuning-Frequenz darstellt. Die Tuning-Frequenz von Lautsprecher-Bassreflexsystemen bestimmt sich in erster Linie durch die Maße des Bassreflex-Ports und Größe des Gehäusevolumens (WinISD, 2006, S. 15). Da die Portmaße dieselben bleiben, sich jedoch das theoretische Gehäuse-Volumen ändert, beeinflusst dies auch die Tuning-Frequenz. Eine Veränderung der Tuning-Frequenz hat eine Verschiebung des Impedanzverlaufs zur Folge. Insbesondere in den Spitzen bzw. Resonanzfrequenzen führt bereits eine geringe Verschiebung des Impedanzverlaufs bzw. der Änderung der Tuning-Frequenz zu einer großen Impedanzänderung. Diese Theorie würde erklären, weshalb bereits ein Temperaturanstieg einen signifikanten Einfluss auf die Lautsprecherimpedanz und somit auf die Endstufenausgangsstromstärke nehmen könnte. Anhand der Abbildung 31 soll beispielhaft die Theorie der Erklärung 3 verdeutlicht werden. Dargestellt sind zwei Impedanzverläufe des untersuchten Treibers (18TLW3000) in einem 160 Liter Bassreflex-Gehäuse. Die Verläufe wurden mit der Software *WinISD* (Version 0.7.950) des Entwicklers Linearteam simuliert. Der einzige Unterschied der beiden Verläufe liegt in der Tuning-Frequenz. Der rote Verlauf wurde mit einer Tuningfrequenz von 35 Hz simuliert und der grüne mit 40 Hz. Im direkten Vergleich dieser beiden Verläufe sind insbesondere in den Spitzen deutliche Impedanzunterschiede sichtbar. Noch deutlicher wird die Impedanzänderung bei der Betrachtung von nur einer Frequenz, wie es bei dem Sinus-Messsignal der Fall war. Die Abbildung bestätigt also, dass bereits eine geringfügige Änderung der Tuning-Frequenz einen beträchtlichen Einfluss auf den Impedanzverlauf nehmen kann. Mit großer Wahrscheinlichkeit repräsentiert die Simulation nicht die tatsächlichen Verläufe, da

das vorgespannte Leergehäuse während der Temperaturuntersuchung sicherlich die Impedanz manipuliert hat. Dennoch wird der Grundgedanke dieser Theorie an diesem Beispiel deutlich. Inwieweit die Erklärung 3 der Realität entspricht, erfordert tiefere Untersuchungen, die sowohl das Thema als auch den Umfang dieser Ausarbeitung überschreiten würden.

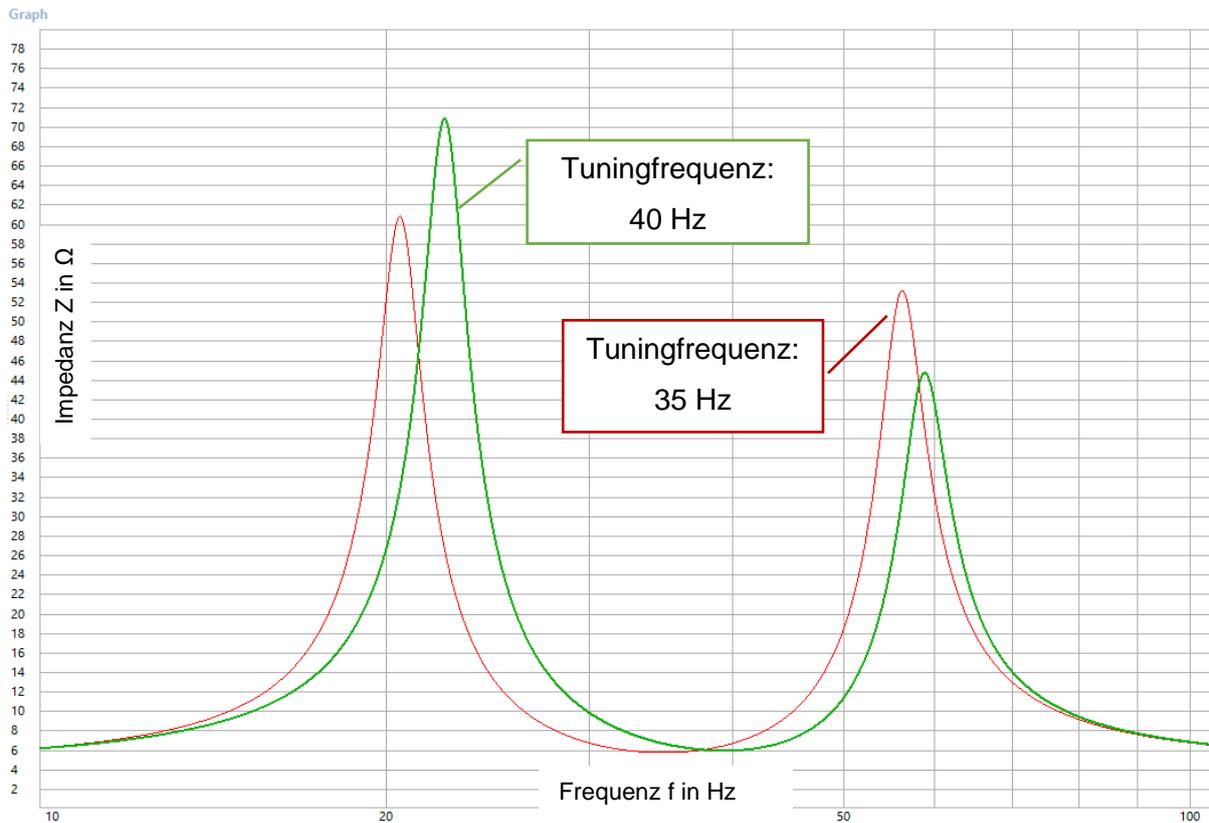


Abbildung 31: Simulierte Impedanzverläufe [Eigene Darstellung] – Software: WinISD (Version 0.7.950) des Entwicklers Linearteam; Treiber: 18TLW3000, Bassreflex-System, Volumen 160 Liter, einziger Unterschied liegt in der Tuning-Frequenz: (Rot) 35 Hz und (Grün) 40 Hz.

6 Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde das thermische Grenzlastverhalten von Tiefton-Hochleistungslautsprechern in Abhängigkeit von aktiver und passiver Kühlung untersucht. Das Kernziel war, herauszufinden, ob eine Wasserkühlung ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung von Tiefton-Hochleistungslautsprechern sein kann. Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurden zwei zentrale Aspekte realisiert. Zum einen wurde eine selbstentwickelte Wasserkühlung konstruiert und angefertigt. Zum anderen wurde eine Temperaturuntersuchung in Form eines Laborexperimentes durchgeführt. Auf Grundlage dessen kann die Kernfrage folgendermaßen beantwortet werden:

Ob eine Wasserkühlung ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastbarkeitsoptimierung ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Hierzu zählen insbesondere der Temperaturanstieg, die Kühlung, die Kühlwirkung und die daraus resultierende Lautsprechertemperatur. Die Erkenntnisse über diese Faktoren und ihr Zusammenspiel geben Antwort auf die Fragestellung. Die Wasserkühlung ist dann ein geeignetes Mittel zur Optimierung, wenn der Temperaturanstieg hoch, die Kühlung effizient, die Kühlwirkung groß und die resultierende Lautsprechertemperatur gering ist. Dadurch lässt sich eine konstruktionsbedingte Effizienzsteigerung des Lautsprechers und eine Steigerung der thermischen Belastbarkeit realisieren. Wenn einer der genannten Einflussfaktoren nicht zutrifft, ist entweder eine Wasserkühlung überflüssig, oder es besteht die Gefahr einer thermischen Überlastung des Treibers. Ein hoher Temperaturanstieg ist dann gegeben, wenn die Signaldauer lang und die Signalleistung hoch ist. Ein Crest-Faktor des Grenzlastsignals von ≤ 9 dB in Kombination mit einer Signaldauer von über 60 Minuten erzeugt bereits einen kritischen Temperaturanstieg. Hier ist eine Wasserkühlung ein besonders geeignetes Mittel, vorausgesetzt die oben genannten Faktoren treffen ebenfalls zu. Die aktiv gekühlte Schwingspulentemperatur beträgt in etwa die Hälfte der passiv gekühlten Variante. Der Faktor einer effizienten Kühlung ist demnach durch die Wasserkühlung auch gegeben. Das Zusammenspiel des hohen Temperaturanstiegs und der effizienteren Wasserkühlung erzeugt eine hohe Kühlwirkung. Diese wird im direkten Vergleich zwischen der aktiven und passiven Variante deutlich. So beträgt hier die Schwingspulentemperatur-Differenz bei einer Endstufenausgangsleistung von etwa 900 Watt RMS bereits nach 60 Minuten 106 °C. Dieser Wert beträgt mehr als Hälfte der kritischen Schwingspulentemperatur von 200 °C, demnach ist der Faktor einer hohen Kühlwirkung ebenfalls gegeben. In Anbetracht der oben genannten Faktoren ist die geringe Lautsprechertemperatur gleichermaßen gegeben. So lag in zwei von drei Temperaturuntersuchungen die Maximal-Temperaturdifferenz deutlich unter dem Richtwert von 50 °C. In der dritten Untersuchung lag der Wert mit 109 °C zwar deutlich drüber, jedoch konnte das Erreichen einer kritischen Temperatur verhindert werden. Demnach sind alle

erreichten Lautsprecheremperaturen als verhältnismäßig niedrig zu betrachten. Zusammenfassend sind also unter Berücksichtigung der genannten Umstände alle Faktoren gegeben, damit eine Wasserkühlung ein geeignetes Mittel zur Effizienz- und Belastungsoptimierung von Tiefton-Hochleistungslautsprechern sein kann.

Im Zuge der Untersuchung wurden weitere relevante Erkenntnisse erlangt. Die Hypothese, dass überhaupt ein Optimierungsbedarf für die vorhandene passive Kühlung besteht, wurde im Zuge der Temperaturuntersuchung bestätigt. So stellte sich im Grenzlastbetrieb heraus, dass sich sowohl die Temperaturverläufe bei gleicher Kühlung und unterschiedlicher Belastung als auch bei gleicher Belastung und unterschiedlicher Kühlung gravierend voneinander unterscheiden. Darüber hinaus besitzt die erarbeitete Wasserkühlung ein effektiv gestaltetes Funktionsprinzip und erfüllt somit das gesetzte Teilziel. Die Kriterien eines festgelegten Temperaturanstiegs von bis zu 50 °C wurden zwar nur teilweise erfüllt, jedoch beträgt die gekühlte Schwingspulentemperatur dennoch lediglich die Hälfte der passiv gekühlten Variante. Demzufolge wird das Funktionsprinzip, wie bereits erwähnt, trotz Nichterfüllung der Kriterien, als effektiv gestaltet betrachtet. Die Erkenntnisse in Bezug auf die Powercompression entsprechen nicht den Erwartungen. Nur der Schwingspulenwiderstand und die Endstufenausgangsspannung verhielten sich wie erwartet. Im Zuge des Temperaturanstiegs erhöhte sich der Schwingspulenwiderstand und die Endstufenausgangsspannung blieb konstant. Die Endstufenausgangsstromstärke und somit auch die Endstufenausgangsleistung hingegen verhielten sich nicht wie erwartet. Diese sind beide im Zuge des Temperaturanstiegs ebenfalls angestiegen, statt zu fallen. Eine mutmaßliche Theorie für diesen Sachverhalt könnte eine temperaturabhängige Verschiebung der Lautsprecherimpedanz sein.

Die interne Validität der Forschung konnte zum Großteil sichergestellt werden, sodass die Aussagekraft der Ergebnisse bezogen auf die Forschungsfrage weiterhin gegeben ist. So wurde die Herausforderung der Suche eines geeigneten Labors unter den Corona-Pandemie bedingten Einschränkungen erfolgreich gemeistert. Lediglich die Temperaturuntersuchung musste minimale Kompromisse eingehen, um die Lärmemission zu ansässigen Nachbarn möglichst gering zu halten. Die interne Validität der Forschung wurde dadurch jedoch in keinem relevanten Maße beeinflusst. Darüber hinaus stellten einerseits die Ein- und Ausschlusskriterien der Temperaturuntersuchung eine fehlerfreie Ermittlung der Messwerte dar. Andererseits wurden sämtliche Störvariablen mittels sorgfältig ermittelter Korrekturfaktoren auf ein Minimum reduziert. Dadurch gelang es weitgehend, dass Veränderungen der abhängigen Variablen ausschließlich durch die unabhängigen Variablen zustande kamen. Die steigende Endstufenausgangsstromstärke und -leistung manipulierte diesen Vorgang zwar, jedoch wirkte sich dies in keinem relevanten Maß auf die Beantwortung der Forschungsfrage aus. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist trotz dessen weiterhin

gegeben. Die externe Validität der Forschung wurde weitestmöglich sichergestellt. So orientieren sich die Effektivwerte der gewählten Belastungen an den Belastbarkeitsangaben des Herstellers und stellen somit einen praxisrelevanten Bezug dar. Die Kernaussage der Ergebnisse lässt sich daher auch auf andere Situationen übertragen, die sich außerhalb eines Laborexperimentes befinden. Aufgrund gewisser Corona-Pandemie bedingter Einschränkungen besteht keine gesicherte Generalisierbarkeit der Ergebnisse. Die Kernaussage und die wesentlichen Erkenntnisse erscheinen dennoch valide. Durch die detaillierte und umfangreiche methodische Ausarbeitung ist die Reliabilität und somit die Reproduzierbarkeit der Temperaturuntersuchung gewährleistet. Die Reproduzierbarkeit der Wasserkühlung ist lediglich bis zu einem gewissen Teil gegeben. So wurden exakte Fertigungszeichnungen bzw. Maßangaben bewusst nicht mit aufgeführt, denn das explizite Erstellen von Kopien ist nur unter Umständen nach persönlicher Absprache gewünscht.

Diese Bachelorarbeit hat einen ersten Forschungsbeitrag zum Thema thermisches Grenzlastverhalten von Tiefton-Hochleistungslautsprechern in Abhängigkeit von aktiver und passiver Kühlung geleistet. Durch den Fokus auf die zwei oben genannten zentralen Aspekte konnte im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht genauer der Einfluss auf den Schalldruckpegel untersucht werden. Dieser könnte jedoch einen bedeutenden Ansatz für weiterführende Forschungen bieten. Zudem wurde im Hinblick auf zukünftige Untersuchungen die Wasserzulauftemperatur, Wasserablauftemperatur und die Wasserdurchflussmenge ermittelt. Diese bieten unter Umständen in Kombination mit den anderen Variablen ebenfalls aufschlussreiche Informationen für weiterführende Prozesse, wie z.B. die Dimensionierung der Wasserkühlleistung für einen geschlossenen Kühlkreislauf oder die Auslegung des benötigten Pumpen-Fördervolumens zur Anwendungsoptimierung.

Quellenverzeichnis

- Audio Engineering Society.** (2012). Definitions. In *AES2-2012*. New York: Audio Engineering Society.
- Behler, G.** (2015). *Aufbau-eines-typischen-elektrodynamischen-Konuslautsprechers: production-partner*. Abgerufen am 27. 09 2020 von <https://www.production-partner.de/wp-content/uploads/2015/03/Aufbau-eines-typischen-elektrodynamischen-Konuslautsprechers-Copyright-Gottfried-Behler.png>
- Borwick, J.** (2001). Power handling and heat dissipation. In *Loudspeaker and Headphone Handbook*. Elsevier LTD, Oxford; 3 New edition.
- dichtomatik.** (2020). *Prduktdatenblatt O-Ringe: dichtomatik*. Abgerufen am 14. 09 2020 von <http://de.dichtomatik.com/de/informationen/>
- Dietz, S.** (2019). *Eine Anleitung zum Methodischen Konstruieren: konstruktionspraxis*. Abgerufen am 21. 09 2020 von <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/eine-anleitung-zum-methodischen-konstruieren-a-857169/>
- eighteensound.** (2014). *Datasheet 18TLW3000 4Ohm: eighteensound*. Abgerufen am 14. 09 2020 von <http://www.eighteensound.com/en/products/lf-driver/18-0/4/18tlw3000>
- eighteensound.** (2020). *TTC - Tetracoil: eighteensound*. Abgerufen am 12. 09 2020 von <http://www.eighteensound.com/en/technologies/ttc-tetracoil-double-voice-coil/>
- elektrisola.** (2020). *Kupfer: elektrisola*. Abgerufen am 14. 09 2020 von <https://www.elektrisola.com/de/leiternmaterial/kupfer.html>
- elektrotechnik-fachwissen.** (2002). *Scheitelwert: elektrotechnik-fachwissen*. Abgerufen am 27. 09 2020 von <https://www.elektrotechnikfachwissen.de/wechselstrom/scheitelwert.php>
- Martin Audio Ltd.** (1980). *F1 Datasheet: Martin-Audio*. Abgerufen am 26. 09 2020 von <https://martin-audio.com/downloads/archive/datasheets/F1datasheet.pdf>
- Martin Audio Ltd.** (2020). *MartinAudioCatalogue: Martin-Audio*. Abgerufen am 26. 09 2020 von <https://static.martin-audio.com/downloads/MartinAudioCatalogue.pdf>
- Sengpiel, E.** (2014). *Berechnungen zur Mikrofonaufnahmetechnik und der Elektro- und Psychoakustik: sengpielaudio*. Abgerufen am 26. 09 2020 von <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-verstaerkung.htm>

UdK Berlin Sengpiel. (2006). *Die drei Messwerte einer Sinusschwingung: sengpielaudio.*

Abgerufen am 26. 09 2020 von

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjoI_v1tnsAhUOxBQKHbzmCqM4ChAWMAR6BAgCEAI&url=http%3A%2F%2Fwww.sengpielaudio.com%2FDieDreiMesswerteEinerSinusschwingung.pdf&usg=AOvVaw2FqyPIsS78pPBYWFchNa4I

Warschkow, K. (2020). *Elektrische Leistung: technik-kiste.* Abgerufen am 18. 09 2020 von

<https://www.technik-kiste.de/wissen/elektrotechnik/elektrische-leistung>

WinISD. (2006). *Bedienungsanleitung für WinISD Pro: WinISD.*

Abgerufen am 11. 10 2020 von

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjb2fjalNzsAhXJxIUkHfd9DFIQFjAGegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.dwusel.de%2Fhifi%2FAnleitung%2520WinISD.pdf&usg=AOvVaw3eiYm92wUr0IE_LPMnYmsC

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: MINDMAP MIT DEN FESTFORDERUNGEN AN DIE WASSERKÜHLUNG	2
ABBILDUNG 2: MINDMAP MIT DEN WUNSCHFORDERUNGEN AN DIE WASSERKÜHLUNG	2
ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES FUNKTIONSPRINZIPS DER WASSERKÜHLUNG	3
ABBILDUNG 4: ERKLÄRUNG DES EFFEKTIV- UND SCHEITELWERTS	4
ABBILDUNG 5: ECKDATEN FÜR DIE LEISTUNGSVERSTÄRKUNG IM LOGARITHMISCHEN MAßSTAB DEZIBEL	5
ABBILDUNG 6: AUFBAU EINES ELEKTRODYNAMISCHEN KONUSLAUTSPRECHERS	6
ABBILDUNG 7: GÄNGIGE LAUTSPRECHER-KÜHLMECHANISMEN	8
ABBILDUNG 8: AUSSCHNITT DES SCHEMATISCHEN AUFBAUS DES ZU UNTERSUCHENDEN TIEFTON-TREIBERS ..	9
ABBILDUNG 9: KONZEPTIONELLE UMSETZUNG EINER WASSERKÜHLUNG	11
ABBILDUNG 10: FUNKTIONSSCHEMA DER WASSERKÜHLUNG	13
ABBILDUNG 11: BEISPIELHAFTE DARSTELLUNG DER LEISTUNGSVERSTÄRKUNG	19
ABBILDUNG 12: SCHEMATISCHER MESSAUFBAU FÜR DIE TEMPERATURUNTERSUCHUNG	20
ABBILDUNG 13: FERTIGGESTELLTER PROTOTYP DER WASSERKÜHLUNG	27
ABBILDUNG 14: EINGebaUTE WASSERKÜHLUNG MIT AUFGESTECKTEM PVC-AQUARIENSCHLAUCH	28
ABBILDUNG 15: TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 1 \triangleq 225 W RMS	29
ABBILDUNG 16: BELASTUNGSDIAGRAMM 1 \triangleq 225 W RMS	30
ABBILDUNG 17: TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 2 \triangleq 450 W RMS	31
ABBILDUNG 18: BELASTUNGSDIAGRAMM 2 \triangleq 450 W RMS	31
ABBILDUNG 19: TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 3 \triangleq 900 W RMS	32
ABBILDUNG 20: BELASTUNGSDIAGRAMM 3 \triangleq 900 W RMS	33
ABBILDUNG 21: TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 4 \triangleq 225 W RMS MIT WASSERKÜHLUNG	34
ABBILDUNG 22: BELASTUNGSDIAGRAMM 4 \triangleq 225 W RMS MIT WASSERKÜHLUNG	34
ABBILDUNG 23: TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 5 \triangleq 450 W RMS MIT WASSERKÜHLUNG	35
ABBILDUNG 24: BELASTUNGSDIAGRAMM 5 \triangleq 450 W RMS MIT WASSERKÜHLUNG	36
ABBILDUNG 25: TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 6 \triangleq 900 W RMS MIT WASSERKÜHLUNG	37
ABBILDUNG 26: BELASTUNGSDIAGRAMM 6 \triangleq 900 W RMS MIT WASSERKÜHLUNG	37
ABBILDUNG 27: VGL. TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 1 UND 4	38
ABBILDUNG 28: VGL. TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 2 UND 5	39
ABBILDUNG 29: VGL. TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 3 UND 6	40
ABBILDUNG 30: ZUSAMMENHANG DER EINFLUSSFAKTOREN	46
ABBILDUNG 31: SIMULIERTE IMPEDANZVERLÄUFE	51

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: MATERIAL FÜR DIE HERSTELLUNG DER WASSERKÜHLUNG.....	10
TABELLE 2: MATERIAL FÜR DIE TEMPERATURUNTERSUCHUNG.....	15
TABELLE 3: ZUSAMMENSETZUNG DER SECHS TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMME	17
TABELLE 4: ERMITTLUNG WIDERSTAND- R_{22}	26
TABELLE 5: UNABHÄNGIGE VARIABLEN FÜR DAS TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 1.....	29
TABELLE 6: UNABHÄNGIGE VARIABLEN FÜR DAS TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 2.....	30
TABELLE 7: UNABHÄNGIGE VARIABLEN FÜR DAS TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 3.....	32
TABELLE 8: UNABHÄNGIGE VARIABLEN FÜR DAS TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 4.....	33
TABELLE 9: UNABHÄNGIGE VARIABLEN FÜR DAS TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 5.....	35
TABELLE 10: UNABHÄNGIGE VARIABLEN FÜR DAS TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 6....	36
TABELLE 11: EXTREMA-KENNWERTE VON TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 1	41
TABELLE 12: EXTREMA-KENNWERTE VON TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 2	42
TABELLE 13: EXTREMA-KENNWERTE VON TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 3	42
TABELLE 14: EXTREMA-KENNWERTE VON TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 4	43
TABELLE 15: EXTREMA-KENNWERTE VON TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 5	43
TABELLE 16: EXTREMA-KENNWERTE VON TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 6	44

Anhang

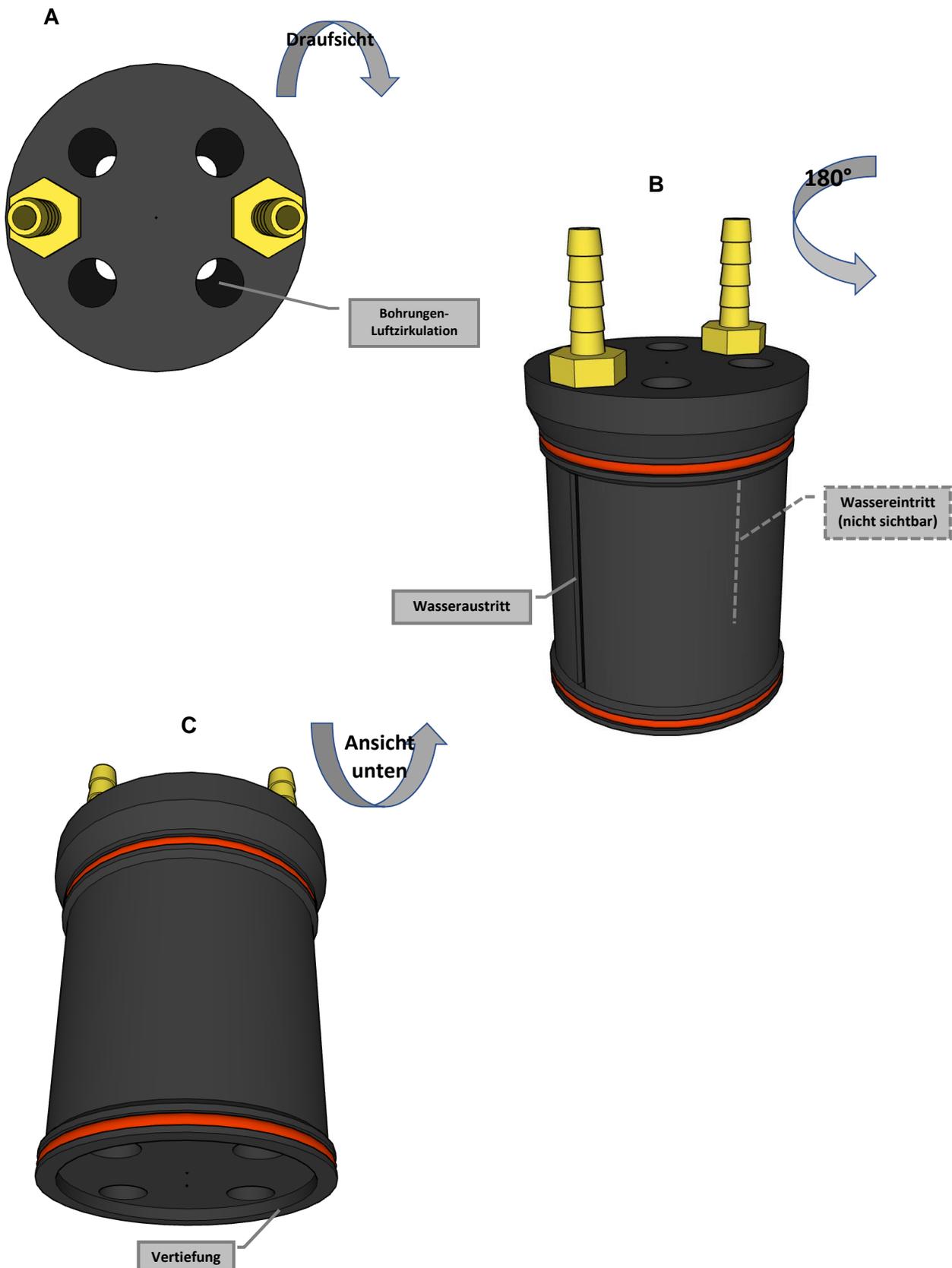
Abbildungsverzeichnis

ANHANG ABBILDUNG 1: WEITERE ANSICHTEN DES 3D-ENTWURFS DER WASSERKÜHLUNG	- 1 -
ANHANG ABBILDUNG 2: GEHÄUSETEMPERATUR ($T_{Gehäuse}$ [°C])	- 2 -
ANHANG ABBILDUNG 3: MAGNETAUßENTEMPERATUR ($T_{Magnet - außen}$ [°C])	- 2 -
ANHANG ABBILDUNG 4: MAGNETINNENTEMPERATUR ($T_{Magnet - innen}$ [°C]).....	- 3 -
ANHANG ABBILDUNG 5: WASSERABLAUFTEMPERATUR ($T_{Wasserablauf}$ [°C])	- 3 -
ANHANG ABBILDUNG 6: $R_{OHM-Ges}$ [Ω].....	- 4 -
ANHANG ABBILDUNG 7: ENDSTUFENAUSGANGSSTROMSTÄRKE (I_{Ges} [AMPERE]).....	- 4 -
ANHANG ABBILDUNG 8: ENDSTUFENAUSGANGSSPANNUNG (U_{Ges} [VOLT]).....	- 5 -
ANHANG ABBILDUNG 9: WASSERDURCHFLUSSMENGE (Q_{Wasser} [l/MIN])	- 5 -
ANHANG ABBILDUNG 10: R22_ZUSATZ+SPULE.....	- 6 -
ANHANG ABBILDUNG 11: R22_ZUSATZ.....	- 6 -
ANHANG ABBILDUNG 12: PLEXIGLASROHR MIT POLKERNDURCHMESSER FÜR TESTVERSUCHE	- 7 -
ANHANG ABBILDUNG 13: ANORDNUNG DER GEHÄUSE	- 8 -

Tabellenverzeichnis

ANHANG TABELLE 1: UNABHÄNGIGE VARIABLEN - TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 1 ..	- 9 -
ANHANG TABELLE 2: MESSWERTE VON TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 1	- 9 -
ANHANG TABELLE 3: MESSWERTE VON BELASTUNGSDIAGRAMM 1	- 9 -
ANHANG TABELLE 4: UNABHÄNGIGE VARIABLEN - TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 2 ..	- 10 -
ANHANG TABELLE 5: MESSWERTE VON TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 2	- 10 -
ANHANG TABELLE 6: MESSWERTE VON BELASTUNGSDIAGRAMM 2	- 10 -
ANHANG TABELLE 7: UNABHÄNGIGE VARIABLEN - TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 3 ..	- 11 -
ANHANG TABELLE 8: MESSWERTE VON TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 3.....	- 11 -
ANHANG TABELLE 9: MESSWERTE VON BELASTUNGSDIAGRAMM 3	- 11 -
ANHANG TABELLE 10: UNABHÄNG. VARIABLEN - TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 4..	- 11 -
ANHANG TABELLE 11: MESSWERTE VON TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 4.....	- 11 -
ANHANG TABELLE 12: MESSWERTE VON BELASTUNGSDIAGRAMM 4	- 12 -
ANHANG TABELLE 13: UNABHÄNG. VARIABLEN - TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 5..	- 12 -
ANHANG TABELLE 14: MESSWERTE VON TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 5.....	- 12 -
ANHANG TABELLE 15: MESSWERTE VON BELASTUNGSDIAGRAMM 5	- 12 -
ANHANG TABELLE 16: UNABHÄNG. VARIABLEN - TEMPERATURVERLAUF- UND BELASTUNGSDIAGRAMM 6..	- 13 -
ANHANG TABELLE 17: MESSWERTE VON TEMPERATURVERLAUF-DIAGRAMM 6.....	- 13 -
ANHANG TABELLE 18: MESSWERTE VON BELASTUNGSDIAGRAMM 6	- 13 -

Weitere Ansichten des 3D-Entwurfs der Wasserkühlung



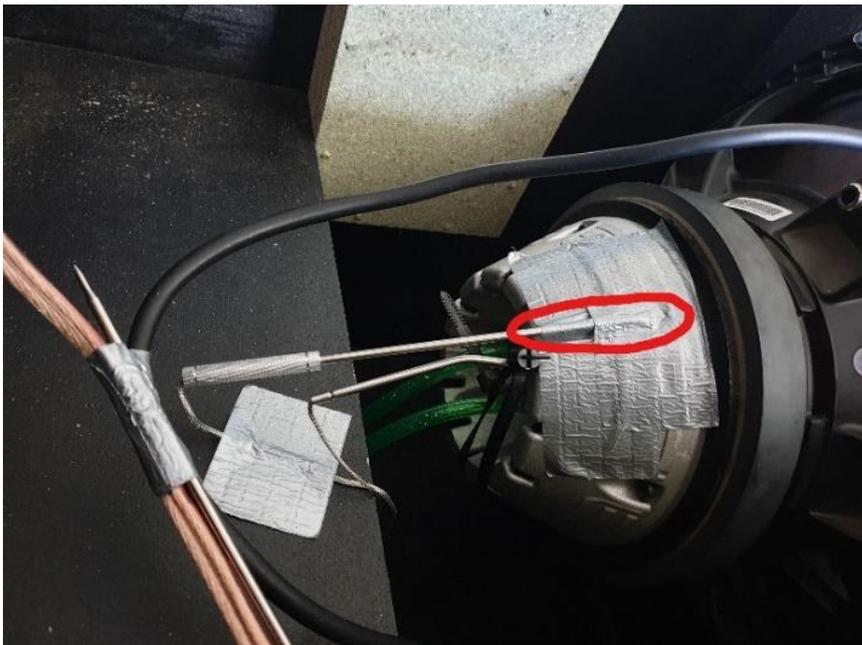
Anhang Abbildung 1: Weitere Ansichten des 3D-Entwurfs der Wasserkühlung [Eigene Darstellungen]. (A) zeigt die Wasserkühlung aus der Vogelperspektive mit Blick auf die vier durchgängigen Bohrungen für die Luftzirkulation. (B) zeigt die Wasserkühlung aus 3.1.3 in 180° gedreht. Hier ist nun der Wasseraustritt sichtbar. (C) zeigt die Wasserkühlung aus der Froschperspektive mit Blick auf die Vertiefung.

Gehäusetemperatur ($T_{\text{Gehäuse}} [^{\circ}\text{C}]$)



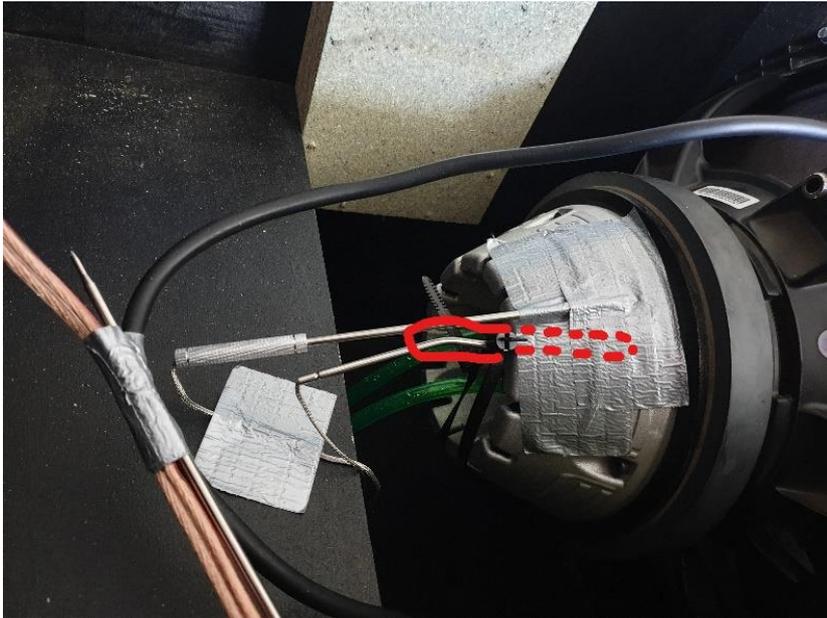
Anhang Abbildung 2: Gehäusetemperatur ($T_{\text{Gehäuse}} [^{\circ}\text{C}]$) [Eigene Darstellung] - Für die Ermittlung der Gehäusetemperatur wurde die Messsondenspitze (rot umkreist) möglichst zentral und mittig im Subwoofer-Gehäuse positioniert, da hier die Gehäusedurchschnittstemperatur zu erwarten ist.

Magnetaußentemperatur ($T_{\text{Magnet-außen}} [^{\circ}\text{C}]$)



Anhang Abbildung 3: Magnetaußentemperatur ($T_{\text{Magnet-außen}} [^{\circ}\text{C}]$) [Eigene Darstellung] - Für die Ermittlung der Magnetaußentemperatur wurde die Messsondenspitze (rot umkreist) am äußeren Bereich des Magneten bzw. der Kühl- und Abdeckvorrichtung mittels Gewebeklebeband befestigt.

Magnetinnentemperatur ($T_{\text{Magnet-innen}} [^{\circ}\text{C}]$)



Anhang Abbildung 4: Magnetinnentemperatur ($T_{\text{Magnet-innen}} [^{\circ}\text{C}]$) [Eigene Darstellung] – Für die Ermittlung der Magnetinnentemperatur wurde die Messsondenspitze in eine vorhandene Bohrung im Magneten gesteckt und mittels Kabelbinder befestigt. Da die Messsondenspitze bzw. die Bohrung im Magneten aufgrund seiner verdeckten Position und der geringen Größe nicht möglich war zu fotografieren, ist diese lediglich mit einer rot gestrichelten Linie angedeutet.

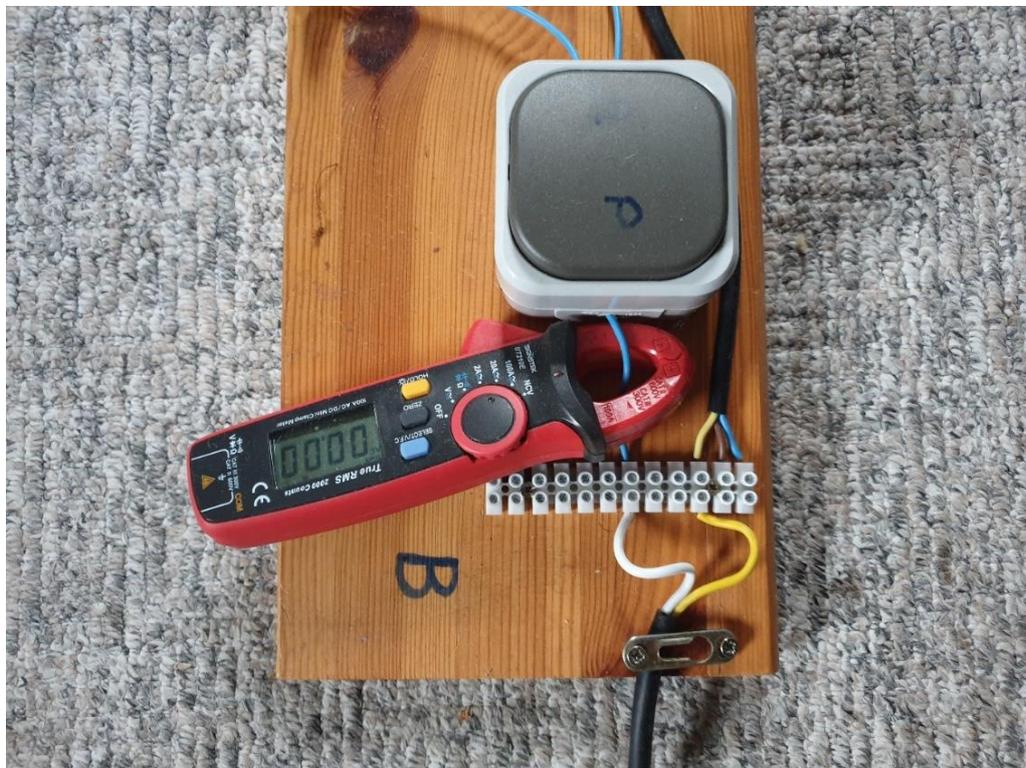
Wasserablauftemperatur ($T_{\text{Wasserablauf}} [^{\circ}\text{C}]$)



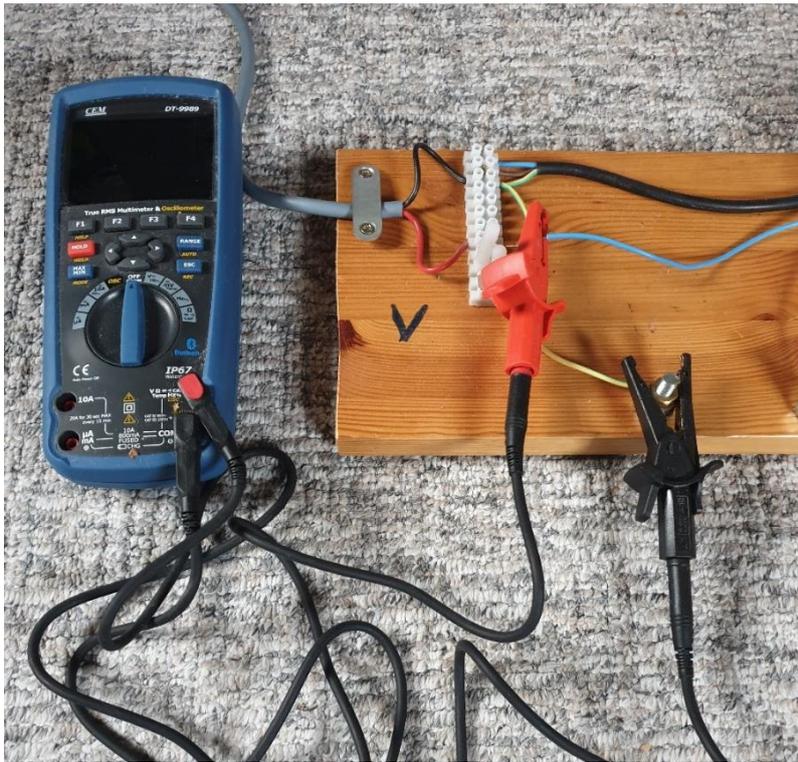
Anhang Abbildung 5: Wasserablauftemperatur ($T_{\text{Wasserablauf}} [^{\circ}\text{C}]$) [Eigene Darstellung].

$R_{Ohm-Ges}$ [Ω]

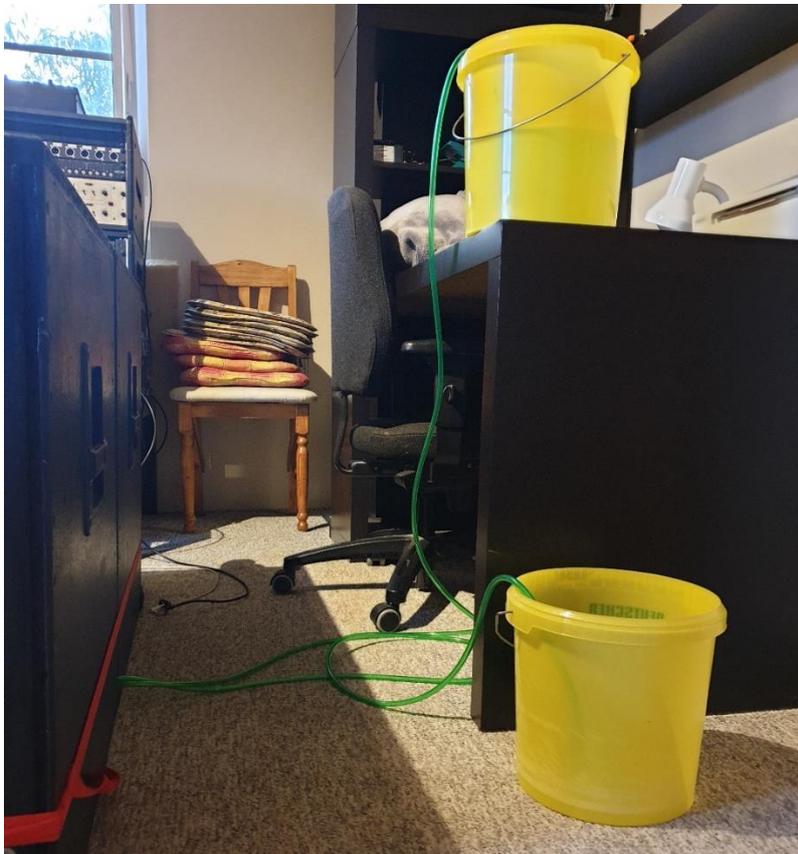
Anhang Abbildung 6: $R_{Ohm-Ges}$ [Ω] [Eigene Darstellung].

Endstufenausgangsstromstärke (I_{Ges} [Ampere])

Anhang Abbildung 7: Endstufenausgangsstromstärke (I_{Ges} [Ampere]) [Eigene Darstellung].

Endstufenausgangsspannung (U_{Ges} [Volt])

Anhang Abbildung 8: Endstufenausgangsspannung (U_{Ges} [Volt]) [Eigene Darstellung].

Wasserdurchflussmenge (Q_{Wasser} [l/min])

Anhang Abbildung 9: Wasserdurchflussmenge (Q_{Wasser} [l/min]) [Eigene Darstellung].

Widerstand- R_{22} (R_{22} [Ohm])



Anhang Abbildung 10: R_{22} _Zusatz+Spule [Eigene Darstellung].



Anhang Abbildung 11: R_{22} _Zusatz [Eigene Darstellung].

Plexiglasrohr mit Polkerndurchmesser für Testversuche



Anhang Abbildung 12: Plexiglasrohr mit Polkerndurchmesser für Testversuche [Eigene Darstellung]. (A) – Plexiglasrohr und Wasserkühlung einzeln. (B) – Plexiglasrohr verbunden mit der Wasserkühlung.

Anordnung der Gehäuse



Anhang Abbildung 13: Anordnung der Gehäuse mit Einblick in den zu untersuchenden Lautsprecher [Eigene Darstellung]. Während den Temperaturuntersuchungen waren beide Gehäuse geschlossen.

Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 1

Anhang Tabelle 1: unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 1 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 1					
I_{Ges} [Watt RMS]:	$\cong 225$	Wasserkühlung:	Nein	R_{22} [Ω):	2,33
U_{Ges} [Volt]:	44,5	Q_{Wasser} [l/min]:	-	$R_{Korrektur}$ [Ω):	0,19
Signal:	Sinus	$T_{Wasserzulauf}$ [$^{\circ}C$):	-	α_{Cu}	0,004
f_{Signal} [Hz]:	70				

Anhang Tabelle 2: Messwerte von Temperaturverlauf-Diagramm 1 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$T_{Gehäuse}$ [$^{\circ}C$]	22	24	25	26	26	27	28	29	29	30	31	31
$T_{Magnet-außen}$ [$^{\circ}C$]	22	25	28	30	32	34	35	37	38	40	41	43
$T_{Magnet-innen}$ [$^{\circ}C$]	22	34	38	42	45	47	49	51	53	55	57	59
$T_{Schwing}$ [$^{\circ}C$]	22	36	42	47	49	53	56	58	59	63	66	68
$T_{Wasserablauf}$ [$^{\circ}C$]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
32	33	33	34	34	35	35	35	36	36	37	37	37
44	45	46	47	48	49	49	50	50	51	51	52	52
61	63	64	66	67	69	70	71	72	72	73	73	74
70	73	76	79	80	82	83	85	85	86	88	88	89
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anhang Tabelle 3: Messwerte von Belastungsdiagramm 1 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$R_{Schwing}$	2,33	2,46	2,51	2,56	2,58	2,61	2,64	2,66	2,67	2,71	2,73	2,75	2,77
I_{Ges}	5	5	5,1	5,1	5,2	5,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,5	5,5	5,6
P_{Ges}	223	223	227	227	231	236	236	240	240	240	245	245	249

65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
2,8	2,82	2,85	2,86	2,88	2,89	2,91	2,91	2,92	2,93	2,93	2,94
5,6	5,6	5,7	5,7	5,7	5,8	5,8	5,8	5,8	5,9	5,9	5,9
249	249	254	254	254	258	258	258	258	263	263	263

Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 2

Anhang Tabelle 4: unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 2 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 2					
I _{Ges} [Watt RMS]:	≅ 450	Wasserkühlung:	Nein	R ₂₂ [Ω]:	2,33
U _{Ges} [Volt]:	60	Q _{Wasser} [l/min]:	-	R _{Korrektur} [Ω]:	0,3
Signal:	Sinus	T _{Wasserzulauf} [°C]:	-		
f _{Signal} [Hz]:	70			α _{Cu}	0,004

Anhang Tabelle 5: Messwerte von Temperaturverlauf-Diagramm 2 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
T _{Gehäuse} [°C]	23	25	27	29	30	32	33	35	36	37	39	40	
T _{Magnet-außen} [°C]	23	28	33	37	41	45	48	50	53	55	58	60	
T _{Magnet-innen} [°C]	23	44	53	59	65	70	74	78	81	85	88	91	
T _{Schwing} [°C]	23	47	57	62	70	77	81	89	93	97	103	105	
T _{Wasserablauf} [°C]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
	41	42	44	45	46	47	48	49	50	51	52	52	53
	62	64	66	67	69	71	73	74	76	77	78	80	81
	93	96	98	100	103	105	107	109	110	113	114	116	117
	107	112	112	118	116	119	121	124	126	129	130	130	132
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anhang Tabelle 6: Messwerte von Belastungsdiagramm 2 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
R _{Schwing}	2,34	2,56	2,65	2,7	2,77	2,83	2,87	2,94	2,98	3,02	3,07	3,09	3,11
I _{Ges}	7,4	7,5	7,5	7,6	7,7	7,7	7,8	7,9	7,9	8	8	8,1	8,1
P _{Ges}	444	450	450	456	462	462	468	474	474	480	480	486	486
	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	
	3,15	3,15	3,21	3,19	3,22	3,24	3,26	3,28	3,31	3,32	3,32	3,34	
	8,1	8,1	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	
	486	486	492	492	492	492	492	498	498	498	498	498	

Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 3

Anhang Tabelle 7: unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 3 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 3					
I _{Ges} [Watt RMS]:	± 900	Wasserkühlung:	Nein	R ₂₂ [Ω]:	2,33
U _{Ges} [Volt]:	82	Q _{Wasser} [l/min]:	-	R _{Korrektur} [Ω]:	0,21
Signal:	Sinus	T _{Wasserzulauf} [°C]:	-		
f _{Signal} [Hz]:	70			α _{Cu}	0,004

Anhang Tabelle 8: Messwerte von Temperaturverlauf-Diagramm 3 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T _{Gehäuse} [°C]	21	26	30	33	37	40	44	47	50	53	56	59	62
T _{Magnet-außen} [°C]	21	32	43	53	61	69	77	83	90	96	102	107	114
T _{Magnet-innen} [°C]	21	64	83	98	110	122	133	143	152	160	168	176	183
T _{Schwing} [°C]	23	89	105	127	136	148	154	171	177	183	193	197	204
T _{Wasserablauf} [°C]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Anhang Tabelle 9: Messwerte von Belastungsdiagramm 3 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
R _{Schwing}	2,34	2,94	3,09	3,29	3,37	3,48	3,54	3,69	3,75	3,8	3,9	3,93	4
I _{Ges}	10,9	10,6	10,7	10,8	10,9	11	11,1	11,2	11,2	11,3	11,3	11,3	11,3
P _{Ges}	894	869	877	886	894	902	910	918	918	927	927	927	927

Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 4

Anhang Tabelle 10: unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 4 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 4					
I _{Ges} [Watt RMS]:	± 225	Wasserkühlung:	Ja	R ₂₂ [Ω]:	2,33
U _{Ges} [Volt]:	46	Q _{Wasser} [l/min]:	0,71	R _{Korrektur} [Ω]:	0,3
Signal:	Sinus	T _{Wasserzulauf} [°C]:	16		
f _{Signal} [Hz]:	70			α _{Cu}	0,004

Anhang Tabelle 11: Messwerte von Temperaturverlauf-Diagramm 4 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
T _{Gehäuse} [°C]	23	24	25	26	26	27	27	28	28	28	29	29
T _{Magnet-außen} [°C]	22	24	25	26	27	28	28	28	29	29	30	30
T _{Magnet-innen} [°C]	21	26	27	28	28	29	29	30	30	30	30	30
T _{Schwing} [°C]	21	26	30	31	31	32	33	34	35	36	37	37
T _{Wasserablauf} [°C]	16	17	17	18	18	18	18	18	18	19	19	19

60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
29	29	29	30	30	30	30	30	30	31	31	31	31
30	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	32	32
31	31	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32
38	38	39	39	41	41	42	43	43	43	43	44	44
19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19

Anhang Tabelle 12: Messwerte von Belastungsdiagramm 4 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$R_{Schwing}$	2,32	2,37	2,4	2,41	2,41	2,42	2,43	2,44	2,45	2,46	2,47	2,47	2,48
I_{Ges}	4,9	5	5	5	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
P_{Ges}	225	230	230	230	235	235	235	235	235	235	235	235	235
	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	
	2,48	2,49	2,49	2,5	2,5	2,51	2,52	2,52	2,52	2,52	2,53	2,53	
	5,1	5,1	5,1	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	
	235	235	235	239	239	239	239	239	239	239	239	239	

Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 5

Anhang Tabelle 13: unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 5 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 5					
I_{Ges} [Watt RMS]:	$\cong 450$	Wasserkühlung:	Ja	R_{22} [Ω]:	2,33
U_{Ges} [Volt]:	65	Q_{Wasser} [l/min]:	0,71	$R_{Korrektur}$ [Ω]:	0,26
Signal:	Sinus	$T_{Wasserzulauf}$ [$^{\circ}C$]:	16	α_{Cu}	0,004
f_{Signal} [Hz]:	70				

Anhang Tabelle 14: Messwerte von Temperaturverlauf-Diagramm 5 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
$T_{Gehäuse}$ [$^{\circ}C$]	21	25	27	28	30	31	32	32	33	34	34	35	
$T_{Magnet-außen}$ [$^{\circ}C$]	21	25	28	30	32	33	34	35	36	37	37	38	
$T_{Magnet-innen}$ [$^{\circ}C$]	20	33	35	36	37	38	39	40	40	41	42	42	
$T_{Schwing}$ [$^{\circ}C$]	21	38	41	41	42	43	45	47	47	48	49	51	
$T_{Wasserablauf}$ [$^{\circ}C$]	16	18	18	19	19	19	19	19	19	19	19	20	
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
	36	36	36	37	37	38	38	39	39	39	40	40	40
	39	39	40	40	40	41	41	42	42	42	43	43	43
	43	43	43	43	44	44	45	45	45	45	45	45	46
	51	53	53	53	54	55	56	56	57	57	58	59	59
	20	20	20	20	20	20	20	20	20	21	21	21	21

Anhang Tabelle 15: Messwerte von Belastungsdiagramm 5 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$R_{Schwing}$	2,32	2,48	2,5	2,5	2,51	2,52	2,54	2,56	2,56	2,57	2,58	2,6	2,6
I_{Ges}	7	7,1	7,2	7,3	7,3	7,4	7,4	7,5	7,5	7,5	7,5	7,6	7,6
P_{Ges}	455	462	468	475	475	481	481	488	488	488	488	494	494
	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	
	2,61	2,61	2,61	2,62	2,63	2,64	2,64	2,65	2,65	2,66	2,67	2,67	
	7,6	7,6	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	
	494	494	494	501	501	501	501	501	501	501	501	501	

Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 6

Anhang Tabelle 16: unabhängige Variablen für das Temperaturverlauf- und Belastungsdiagramm 6 [Eigene Darstellung].

Temperaturuntersuchung 6					
I_{Ges} [Watt RMS]:	$\cong 900$	Wasserkühlung:	Ja	R_{22} [Ω):	2,33
U_{Ges} [Volt]:	90	Q_{Wasser} [l/min]:	0,71	$R_{\text{Korrektur}}$ [Ω):	0,19
Signal:	Sinus	$T_{\text{Wasserzulauf}}$ [$^{\circ}\text{C}$):	16	α_{Cu}	0,004
f_{Signal} [Hz]:	70				

Anhang Tabelle 17: Messwerte von Temperaturverlauf-Diagramm 6 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$T_{\text{Gehäuse}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	22	33	37	40	42	44	46	48	49	51	52	53
$T_{\text{Magnet-außen}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	21	34	39	43	46	49	52	54	56	57	59	60
$T_{\text{Magnet-innen}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	20	47	51	55	57	60	62	64	65	67	69	69
T_{Schwing} [$^{\circ}\text{C}$]	20	63	74	77	79	83	84	90	90	94	95	96
$T_{\text{Wasserablauf}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	16	19	20	21	21	22	22	22	22	23	23	23

60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
55	56	57	58	59	60	61	62	62	63	64	64	65
62	63	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
71	72	73	74	75	76	77	77	79	79	81	82	82
98	100	102	102	103	104	106	108	109	108	109	109	109
23	24	24	24	24	24	24	24	24	24	25	25	25

Anhang Tabelle 18: Messwerte von Belastungsdiagramm 6 [Eigene Darstellung].

Δt [min]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
R_{Schwing}	2,31	2,71	2,81	2,83	2,85	2,89	2,9	2,95	2,95	2,99	3	3,01	3,03
I_{Ges}	10	10,2	10,4	10,5	10,7	10,8	11	11	11,1	11,2	11,3	11,3	11,4
P_{Ges}	900	918	936	945	963	972	990	990	999	1008	1017	1017	1026

65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
3,04	3,06	3,06	3,07	3,08	3,1	3,12	3,13	3,12	3,13	3,13	3,13
11,5	11,6	11,6	11,6	11,7	11,7	11,8	11,8	11,8	11,9	12	12
1035	1044	1044	1044	1053	1053	1062	1062	1062	1071	1080	1080