

Die Erwärmung von Turbomolekularpumpen in verschiedenen Betriebszuständen

Diplomarbeit

Vorgelegt von

Sebastian Riegel

Institut für experimentelle Kernphysik

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Referent: Professor Guido Drexlin
Institut für experimentelle Kernphysik

Korreferent: Professor Wim de Boer
Institut für experimentelle Kernphysik

11.01.2011

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt habe, alle benutzten Hilfsmittel vollständig angegeben sind und alles kenntlich gemacht habe, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Abänderung übernommen wurde.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Turbomolekularpumpen	2
1.2	Das Karlsruher Tritium Neutrino-Experiment	7
1.2.1	Die Neutrinos	7
1.2.2	Motivation des KATRIN-Experiments	9
1.2.3	Der MAC-E-Filter	10
1.2.4	Der Aufbau	11
1.2.4.1	Die „windowless gaseous tritium source“ (WGTS)	12
1.2.4.2	Die Transportstrecke	12
1.2.4.3	Die Spektrometer	14
1.2.4.3.1	Das Vorspektrometer	14
1.2.4.3.2	Das Hauptspektrometer	15
1.2.4.4	Der Hauptdetektor	17
1.2.4.5	Das Calibration and Monitoring System (CMS)	17
1.2.4.6	Betriebsbedingungen der TMPs bei KATRIN	18
1.3	Einsatz von TMPs bei Fusionskraftwerken	19
1.3.1	Der Tokamak	21
1.3.2	Das Blanket	22
1.3.3	Betriebsbedingungen der TMPs bei JET	22
2.	Modell zur Beschreibung der Rotortemperatur	23
2.1	Erhitzung des Rotors durch Wirbelströme	24
2.2	Gasfluss	27
2.2.1	Gasreibung	27
2.2.2	Wärmeleitung und Konvektion	29
2.3	Wärmetransport durch Wärmestrahlung	31
2.4	Leerlaufleistung	32
2.5	Fit-Algorithmus	32
2.6	Modell 1	33
2.7	Modell 2	34
2.8	Magnetische Abschirmung	34
3.	Versuchsaufbau	36
3.1	Vakuumsystem	37
3.1.1	Vorvakuumsystem	37
3.1.2	Die untersuchten Turbomolekularpumpen	37
3.1.3	Druckmessung	39
3.1.4	Gasflussmessung	40
3.2	Temperaturmessung	40
3.2.1	PT-100-Sensor	40
3.2.2	Kühlung des TMP-Motors	41
3.2.3	Pyrometer	41
3.2.3.1	Kalibration des Pyrometers	42
3.2.3.2	Frühere Kalibrationsmessungen	43
3.2.3.3	Verwendete Methode	45
3.2.3.4	Verbesserungsmöglichkeiten	48

3.3	Magnetsystem	48
3.3.1	Netzteil	49
3.3.2	Helmholtz-Spulen	49
3.3.3	Stromzange	53
3.4	Datenerfassung	54
3.5	Neue Datenerfassung	55
4.	Messungen	57
4.1	Stabilitätsmessungen	57
4.1.1	MAG W 2200	57
4.1.2	MAG W 2800	64
4.2	Temperaturmessungen mit Magnetfeld und/oder Gasfluss	67
4.2.1	Temperaturmessung mit Gasfluss	67
4.2.1.1	MAG W 2200	67
4.2.1.2	MAG W 2800	69
4.2.1.3	Diskussion der Ergebnisse mit Gasfluss	71
4.2.2	Temperaturmessung mit Magnetfeld	72
4.2.2.1	MAG W 2200	72
4.2.2.2	MAG W 2800	74
4.2.2.3	Diskussion der Ergebnisse mit Magnetfeld	76
4.2.3	Temperaturmessung mit Gasfluss und Magnetfeld	77
4.2.3.1	MAG W 2200	77
4.2.3.2	MAG W 2800	79
4.2.3.3	Diskussion der Ergebnisse mit Magnetfeld und Gasfluss	81
4.2.3.4	Veranschaulichung von Modell 2	82
4.2.4	Gesamtüberblick über die Daten	84
4.3	Temperaturmessung mit Magnetfeld und verschiedenen Kühlwassertemperaturen mit der MAG W 2200	88
4.4	Temperaturmessung mit Magnetfeld und Abschirmung mit der MAG W 2800	90
4.5	Messungen mit gepulstem Magnetfeld mit der MAG W 2200	92
5	Zusammenfassung und Ausblick	95

Abbildungsverzeichnis

1.1:	Gaedes erster Entwurf einer Molekularpumpe [4] mit Vorvakuumanschluss (FV), Ansaugstutzen (A), Rotor (R), Sperrspalt (LS), Radius des Rotors (r), Abstand des Rotors zum Stator (h), Pumpkanal (PC), Pumpgehäuse (S) und Drehrichtung (f).....	2
1.2:	Überblick über den Pumpkanal PC mit der Höhe des Ganges (h), der Breite des Ganges (b), der Rotorgeschwindigkeit (u), der Statorwand (W_s), Querschnittsebene E an der Stelle x , $x+\Delta x$ und $x-\Delta x$, und der Rotorwand (W_r).....	3
1.3:	Pumpenentwurf nach Holweck [4] mit Rotorachse (a), Breites des Gewindes (b), Tiefe des Gewindes (h), Rotor (A) und Stator (B)	5
1.4:	Funktionsweise des Rotors [4] anhand der Geschwindigkeit des Rotors (V), dem Abstand der Rotorblätter (h), der Länge der Rotorblätter (b), der Abstand der Rotorblätter in der Horizontalen (t) und dem Winkel der Rotorblätter zur Horizontalen (α).....	5
1.5:	Das Standardmodell der Teilchen [5]	7
1.6:	Funktionsweise des MAC-E-Filters	10
1.7:	Das gesamte KATRIN-Experiment mit folgendem Aufbau von links nach rechts [20].....	11
1.8:	Links die DPS2-F und rechts die CPS [21].....	12
1.9:	Pumpport am Übergang zwischen zwei Teilen der DPS2-F [19].....	13
1.10:	Magnetfeldverteilung anhand der Ummantelung der DPS2-F mit den vier Pumpports [22]	13
1.11:	Das Vor- und das Hauptspektrometer mit den entsprechenden vorherrschenden Magnetfeldern und Elektronenfluss [20]	14
1.12:	Das Vorspektrometer mit einer Länge von 3,38 m und einem Durchmesser in der Mitte von 1,70 m	15
1.13:	Position der Pumpports am Hauptspektrometer (von links nach rechts P2, P1, P3). Die Länge des Hauptspektrometers beträgt 23,3 m und der Durchmesser ist 9,8 m	16
1.14:	Die Detektoroberfläche mit den verschiedenen Pixeln [20]	17
1.15:	Die verschiedenen Plasmaheizmethoden [2]	20
1.16:	Überblick über den Tokamak [2]	21
1.17:	Querschnitt des Blankets und Veranschaulichung der darin stattfindenden Vorgänge [23]	22
2.1:	Wirbelströme in einem Rotor bei Rotation [5].....	24
2.2:	Rotor als Zylinder mit verwendeten Achsen, links dargestellt im Laborsystem und rechts im sich mitbewegenden System [25]	25
2.3:	Stationäre und sich bewegende Platte	28
2.4:	Plancksches Strahlungsspektrum [27]	31
2.5:	Verlauf der Magnetfeldlinien in einer Abschirmung [29]	34
2.6:	Allgemeine Hysteresekurve [5]	35
3.1:	Überblick über den gesamten Versuchsaufbau. Links die Helmholtz-Spule mit TMP und rechts die für die Datenaufnahme verwendeten PCs	36
3.2:	Links MAG W 2800 und rechts MAG W 2200 mit geschwärztem Rotor	37
3.3:	Querschnitt einer TMP und Anordnung der internen Temperatursensoren(PT100, KTY) und Positionssensoren des Magnetlagers	38
3.4:	Anordnung der einzelnen Komponenten	39

3.5:	MAG W 2800 mit zwei angebrachten PT100-Sensoren zur Erfassung der Gehäusetemperatur. In diesem Fall zwei Sensoren, da einer mit dem alten und der andere mit dem neuen Messsystem verbunden ist	40
3.6:	Das verwendete KT15.82 IIP-Pyrometer, links der KF-Flansch und rechts auf dem Deckel die Steckerverbindung zum Auslesen der Spannung	42
3.7:	PT100-Sensor, welcher für die Messung der Oberflächentemperatur im Rahmen der Kalibrierungsmessungen verwendet wurde. Er wurde mit einem Edelstahldraht stabilisiert. Das zu einer Schleife gebogene und abgewinkelte Ende des Drahtes fixiert den flexiblen Foliensensor auf der Oberfläche des Rotors. Eingeführt wird er von oben in den markierten Flansch	43
3.8:	Kalibrationskurve einer Messung mit Heizspindel (MAG W 2800).....	44
3.9:	Kalibrationskurve der MAG W 2200 mit geschwärztem Rotor und einem Emissionsfaktor von $\epsilon = 0,95$	45
3.10:	Überblick über die Kalibrationsruns der MAG W 2800	46
3.11:	Links: Sichtfeld des Pyrometers und rechts Blick durch den Einbringflansch des Sensors (MAG W 2800)	47
3.12:	Chrom-Nickel-Sensor.....	48
3.13:	Das drehbare Helmholtz-Spulen-Paar hat einen Durchmesser von 120 cm und einen Spulenabstand von 60 cm	50
3.14:	Im Vordergrund der Messtisch und im Hintergrund das Spulenpaar, in dessen Mitte sich gerade die Hall-Sonde befindet [36].....	51
3.15:	Definition der Achsen [36].....	51
3.16:	Messungen des Magnetfeldes für das Helmholtz-Spulen-Paar [36]	52
3.17:	Das Amprobe CT235A.....	53
3.18:	Die Stromzange in der gebauten Halterung und einer Zuleitung der Spulen ..	54
3.19:	Schaltplan der Messvorrichtung	54
3.20:	Aufreihung der Signalwandler für die PT100-Sensoren und der analogen Signale von Pyrometer, Gasfluss und Magnetfeld.....	54
4.1:	Positionsparameter Run 100.....	57
4.2:	Positionsparameter Run 101.....	58
4.3:	Positionsparameter Run 103.....	59
4.4:	Positionsparameter Run 104.....	60
4.5:	Positionsparameter Run 105.....	61
4.6:	Positionsparameter Run 106.....	61
4.7:	Positionsparameter Run 107.....	62
4.8:	Positionsparameter Run 109.....	63
4.9:	Positionsparameter Run 100503-1.....	64
4.10:	Positionsparameter Run 100503-2.....	64
4.11:	Positionsparameter Run 100503-2.....	65
4.12:	Positionsparameter Run 100503-4.....	65
4.13:	Rotortemperatur in Abhängigkeit von Stickstoffgasfluss.....	67
4.14:	Gefittete Rotortemperatur im Vergleich mit den Messwerten der Stickstoffgasflussmessung.....	68
4.15:	Rotortemperatur in Abhängigkeit von Stickstoffgasfluss.....	69
4.16:	Gefittete Rotortemperatur im Vergleich mit den Messwerten der Stickstoffgasflussmessung.....	70
4.17:	Rotortemperatur in Abhängigkeit von 4 verschiedenen Magnetfeldstärken	72
4.18:	Gefittete Rotortemperatur im Vergleich mit den Messwerten der Stickstoffgasflussmessung.....	73
4.19:	Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Magnetfeldern.....	74

4.20:	Gefittete Rotortemperatur im Vergleich mit den Messwerten der Stickstoffgasflussmessung	75
4.21:	Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Magnetfeldstärken bei durchgängigem Stickstoffgasfluss	77
4.22:	Gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Rotortemperatur	78
4.23:	Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Magnetfelder bei durchgängigem Stickstoffgasfluss	79
4.24:	Gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur	80
4.25:	Mit Modell 2 gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur	82
4.26:	Mit Modell 2 gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur	83
4.27:	Gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur	84
4.28:	Gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur	85
4.29:	Rotortemperatur in Abhängigkeit von Magnetfeld und Gasfluss (MAG W 2200)	87
4.30:	Rotortemperatur in Abhängigkeit von Magnetfeld und Gasfluss (MAG W 2800)	87
4.31:	Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Kühlwassertemperaturen T_k und einem Magnetfeld von 1 mT	88
4.32:	ST37-Abschirmung montiert an einer TMP an einem Pumpport der DPS2-F	90
4.33:	Vergleich der Rotortemperatur einer Messung mit und ohne Abschirmung	90
4.34:	Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Magnetfelder mit Abschirmung	91
4.35:	Rotortemperatur bei einer Pulsung von 1 min (Feld an) zu 20 min (Feld aus)	92
4.36:	Rotortemperatur bei einer Pulsung von 2 min (Feld an) zu 20 min (Feld aus)	93
4.37:	Lagerposition bei gepulstem Betrieb mit 7,5 mT	93
4.38:	Lagerposition bei gepulstem Betrieb mit 8,5 mT	94

Tabellenverzeichnis

3.1:	Randdaten der beiden verwendeten TMPs	38
3.2:	Geradengleichungen der verschiedenen Kalibrationen (MAG W 2200)	46
3.3:	Geradengleichungen der verschiedenen Kalibrationen (MAG W 2800)	46
3.4:	Geradengleichungen der Kalibrationsmessungen im Gleichgewicht (MAG W 2800).....	47
3.5:	Eigenschaften der Helmholtz-Spulen	49
3.6:	Abweichungen der Homogenität des Magnetfeldes der Helmholtz- Spulen [36]	53
3.7:	Abweichungen der JUMO TMM-45-Wandler.....	54
4.1:	Übersicht über die Grenzwerte der Stabilitätstests (MAG W 2200)	63
4.2:	Konstanten aus Modell 1 mit gemessener Statortemperatur und Gasfluss, Run 138-142 (MAG W 2200)	68
4.3:	Konstanten von Modell 1 aus der Temperaturmessung mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ und Gasfluss, Run 138-142 (MAG W 2200).....	69
4.4:	Konstanten von Modell 1 aus der Temperaturmessung mit gemessener Gehäusetemperatur und Gasfluss, Run 161-184 (MAG W 2800)	70
4.5:	Konstanten der Temperaturmessung mit einer konstanten Gehäuse- temperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ und Gasfluss, Run 161-184 (MAG W 2800).....	71
4.6:	Vergleich der Leistungsbeiträge bei Messungen mit Gasfluss	71
4.7:	Konstanten von Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur und wechselndem Magnetfeld, Run 111-118 (MAG W 2200)	73
4.8:	Konstanten für Modell 1 mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ und Magnetfeld, Run 111-118 (MAG W 2200).....	74
4.9:	Konstanten von Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur und wechselndem Magnetfeld, Run 100505 (MAG W 2800).....	75
4.10:	Konstanten der Temperaturmessung mit einer konstanter Gehäuse- temperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ und wechselndem Magnetfeld, Run 100505 (MAG W 2800).....	76
4.11:	Vergleich der Leistungsbeiträge bei Messungen mit Magnetfeld.....	76
4.12:	Konstanten für Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur durch- gängigem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run 143-148 (MAG W 2200).....	78
4.13:	Konstanten für Modell 1 mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$, durchgängigem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run 143- 148 (MAG W 2200)	79
4.14:	Konstanten für Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur, durch- gängigem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run-165-168 (MAG W 2800).....	80
4.15:	Konstanten für Modell 1 mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$, durchgängigem Gasfluss und Magnetfeld, Run 165-168 (MAG W 2800).....	80
4.16:	Vergleich der Leistungsbeiträge bei Messung mit Magnetfeld und Gasfluss ..	81
4.17:	Konstanten aus Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur, durch- gängigem Gasfluss von 20 sccm und wechselndem Magnetfeld, Run 148 (MAG W 2200).....	81

4.18:	Konstanten aus Modell 2 mit gemessener Gehäusetemperatur, durchgängigem Gasfluss von 20 sccm und wechselndem Magnetfeld, Run 148 (MAG W 2200).....	82
4.19:	Konstanten aus Modell 2 mit gemessener Gehäusetemperatur, durchgängigem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run 168 (MAG W 2800).....	83
4.20:	Konstanten aus Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur, verschiedenem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run 112-118 und 143-148 (MAG W 2200).....	84
4.21:	<i>Konstanten aus Modell 1 mit konstanter Gehäusetemperatur von $T_k=25^\circ\text{C}$, verschiedenem und wechselndem Magnetfeld, Run 112-118 und 143-148 (MAG W 2200).....</i>	85
4.22:	Konstanten aus Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur, verschiedenem und wechselndem Magnetfeld, Run 100505 und 165-168 (MAG W 2800).....	86
4.23:	Konstanten aus Modell 1 mit konstanter Gehäusetemperatur von $T_k=25^\circ\text{C}$, verschiedenem und wechselndem Magnetfeld, Run 100505 und 165-168 (MAG W 2800).....	86
4.24:	Temperaturvergleich bei verschiedenen Kühlwassertemp. und $B=1\text{ mT}$ (MAG W 2200).....	88

1 Einleitung

In vielen Forschungsgebieten und in der industriellen Herstellung wird Ultrahochvakuum (UHV) benötigt. Zu diesem Zweck werden häufig gelagerte Turbomolekularpumpen (TMP) eingesetzt. Die Aufgabe von TMPs umfasst das Abpumpen von Luft ebenso wie das vieler anderer Prozessgase, welche aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften alle ein unterschiedliches Verhalten aufweisen. In Abhängigkeit der Gasart und der Gasmenge kommt es durch Reibung und Konvektion zu einer Erhitzung des Rotors. Neben einem erhöhten Gasfluss können auch extern angelegte Magnetfelder zu einer Erwärmung des schnell drehenden Rotors durch Wirbelströme führen. Für den Einsatz in zwei Experimenten, dem **Karlsruher Tritium Neutrino Experiments (KATRIN)** [1] und dem **Joint European Torus (JET)** [2], soll das Verhalten der TMPs genauer untersucht werden, da sie dort genau diesen Bedingungen ausgesetzt sind. Die verwendeten TMPs sind vom Typ MAG W 2800 bei KATRIN und MAG W 2200 bei JET, welche beide mit einer magnetischen Lagerung ausgestattet sind, um ölfreies Vakuum zu erzeugen.

Bei Überschreitung einer kritischen Rotortemperatur von 120°C kann es laut Hersteller [3] zu dessen Zerstörung kommen. Die Temperatur des frei schwebenden Rotors kann nicht direkt gemessen werden. Daher ist es wichtig seine Temperatur anhand einfach zu messender Parameter vorhersagen zu können. Zu diesem Zweck wurde ein empirisches Modell entwickelt, das die Rotortemperatur mit Hilfe einiger weniger Parameter berechenbar macht. Mithilfe eines drehbaren Helmholtz-Spulen-Paares wurde ein homogenes Magnetfeld in verschiedenen Winkeln zur Rotorachse erzeugt und für verschiedene Feldstärken und Gasflüsse die Rotortemperatur gemessen. Da sich die Rotorblätter mit Überschallgeschwindigkeit bewegen, gibt es nur die Möglichkeit der berührungslosen Temperaturerfassung, wozu ein Pyrometer eingesetzt wurde. Neben der Temperatur des Rotors spielt auch die Stabilität der magnetischen Lager eine wichtige Rolle. Liegen die resultierende Temperatur oder die Auslenkung der Rotorachse außerhalb der Grenzwerte, gibt es die Möglichkeit eine Abschirmung an die TMP anzubringen, um das effektive Magnetfeld abzuschwächen und damit die Wirbelströme zu verringern.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte daher die Durchführung von Messungen der Rotortemperatur bei angelegtem Magnetfeld und/oder Gasfluss. Mit diesen Daten werden die Konstanten für das erstellte Modell zu berechnen und der Einfluss auf Stabilität und Temperatur zu beobachten.

Im Folgenden werden die Funktionsweise von TMPs und deren Anwendung in KATRIN und JET näher erläutert. In Kapitel 2 werden die Modelle zur Rotortemperatur und die physikalischen Effekte, die zu seiner Erwärmung führen, vorgestellt. Kapitel 3 beschreibt den Versuchsaufbau und Kapitel 4 beschäftigt sich mit den Messungen und der Analyse der Daten.

1.1 Turbomolekularpumpen

Die erste Turbomolekularpumpe wurde 1956 von Willi Becker als Weiterentwicklung der Turbopumpe von Wolfgang Gaede gebaut. Die Funktionsweise von aktuellen TMPs wird anhand der zugrunde liegenden Prinzipien der Pumpen von Gaede und Holweck erklärt.

Gaede stellte fest, dass Gasteilchen, wenn sie auf eine Wand treffen, kurz auf dieser verweilen (Adsorption), und sich dann wieder von dieser lösen (Desorption). Wenn sich die Wand dazu noch bewegt, erhalten diese Partikel einen tangentialen Impuls in Richtung der Wandbewegung, was zu einem gerichteten Partikelfluss führt. Aus dieser Beobachtung heraus entwickelte Gaede seine erste Pumpe.

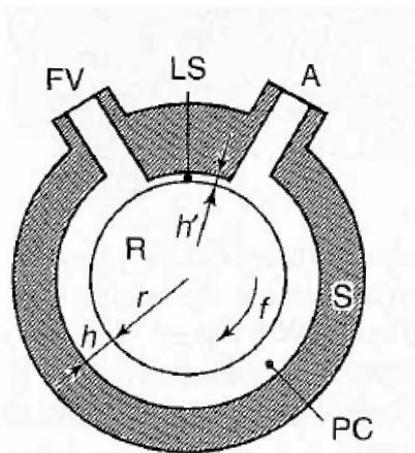


Abbildung 0.1: Gaedes erster Entwurf einer Molekularpumpe [4] mit Vorvakuumananschluss (FV), Ansaugstutzen (A), Rotor (R), Sperrspalt (LS), Radius des Rotors (r), Abstand des Rotors zum Stator (h), Pumpkanal (PC), Pumpgehäuse (S) und Drehrichtung (f)

Im Wesentlichen handelt es sich bei der in Abbildung 0.1 gezeigten Turbopumpe um einen sich mit der Frequenz f drehenden Rotor mit dem Radius r , welcher sich in einem Gehäuse befindet und zu diesem den Abstand h besitzt. Dringen nun Partikel über den Ansaugstutzen A in die Pumpe ein und treffen auf den sich drehenden Rotor, werden sie kurz adsorbiert und erhalten entsprechend der Rotationsrichtung einen Impuls, der sie durch den Pumpkanal PC führt und schließlich beim Vorvakuumanschluss FV wieder aus der Pumpe befördert. Um den direkten Gasfluss von FV zu A zu verhindern ist die Spaltbreite LS des Sperrspalts auf ein Minimum reduziert.

Eine genauere Analyse des Vorgangs ermöglicht die physikalische Beschreibung des maximalen Gasflusses durch die Pumpe. Abbildung 0.2 stellt einen Ausschnitt aus dem Pumpkanal PC dar, in dem Teilchen in Richtung der Rotorgeschwindigkeit u transportiert werden.

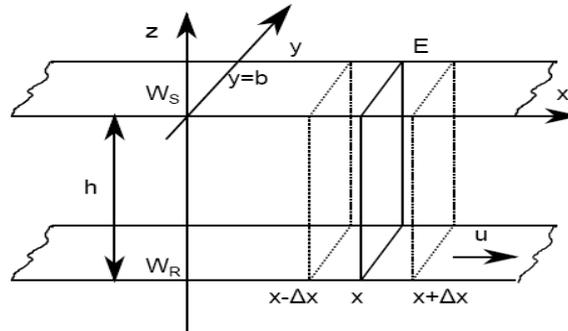


Abbildung 0.2: Überblick über den Pumpkanal PC mit der Höhe des Ganges (h), der Breite des Ganges (b), der Rotorgeschwindigkeit (u), der Statorwand (W_s), Querschnittsebene E an der Stelle x , $x+\Delta x$ und $x-\Delta x$, und der Rotorwand (W_r)

Ist die mittlere freie Weglänge der Gasteilchen deutlich größer als die Höhe h des Kanals, lässt sich der Gasfluss als Teilchenstrom q_N beschreiben:

$$q_N = \frac{dN}{dt} = \frac{1}{2} n u b h \quad (0.1)$$

Hierbei ist N die Teilchenzahl, die in der Zeit t durch die rechteckige Querschnittsebene E mit der Fläche ($b \cdot h$) fließt.

Die Saugleistung S oder der Vakuumfluss q_v einer Pumpe sind definiert durch das Verhältnis zwischen Teilchenstrom und Teilchendichte auf der Saugseite der Pumpe und wird mit folgender Formel berechnet:

$$S = q_v = \frac{q_N}{n} = \frac{1}{2} u b h \quad (0.2)$$

Gleichung 1.2 gilt nur, wenn kein Druckunterschied zwischen dem Ansaugstutzen und dem Vorvakuumanschluss besteht. Weiterhin wurde der Einfluss der vorderen und hinteren Begrenzungswand der Pumpe nicht berücksichtigt, was jedoch nur für $b \gg h$ gilt.

In einer realen Pumpe führt jedoch der Teilchenfluss von A nach FV zu einem Druckgefälle. Daraus folgt ein Rückfluss von Teilchen, der versucht den Druck auszugleichen. Ausgehend von einer Teilchenbewegung von links nach rechts in der y - z -Ebene, ist in der Ebene E an der Stelle x eine Teilchendichte $n(x)$ vorhanden. Rechts davon an der Stelle $x+\Delta x$ dagegen beträgt die Teilchendichte $n(x+\Delta x)$, welche größer als $n(x)$ ist. In der Ebene links davon, an der Stelle $x-\Delta x$ herrscht nur eine Dichte von $n(x-\Delta x)$, welche wiederum kleiner wie $n(x)$ ist.

Für den Teilchenfluss von rechts nach links ergibt sich daraus

$$\bar{q}_{N,th,l} = \frac{\bar{c}}{4} bhn(x + \Delta x) \quad (0.3)$$

und für den Teilchenfluss von links nach rechts

$$\bar{q}_{N,th,r} = \frac{\bar{c}}{4} bhn(x - \Delta x) \quad (0.4)$$

Aus der Kombination dieser beiden Formeln ergibt sich schließlich der Rückfluss zu

$$\bar{q}_{N,th} = \frac{\bar{c}}{4} bh \frac{dn}{dx} 2\Delta x \quad (0.5)$$

Die Größe Δx wird durch $g \cdot h$ ersetzt mit $g > 1$, da hier die mittlere freie Weglänge größer als h ist. Die Auswahl des Punktes Δx beruht auf dem Ort der letzten Kollision der Teilchen mit der Wand um damit ihre isotropische Verteilung sicherzustellen.

$$\bar{q}_{N,th} = \frac{\bar{c}}{2} gbh^2 \frac{dn}{dx} \quad (0.6)$$

Der Gesamtfluss ergibt sich nun aus der Subtraktion von Fluss (0.1) und Rückfluss (0.6). Wird diese Gleichung auf null gesetzt, es werden also weder Gasteilchen gepumpt noch fließen diese zurück, so ist die maximale Kompression erreicht. Die daraus folgende Formel ist:

$$\frac{dn}{n} = \frac{dp}{p} = \frac{u}{\bar{c}gh} dx \quad (0.7)$$

Wird Gleichung (1.7) über die Länge des durchfließenden Kanals L integriert, resultiert daraus die maximale Kompression über Gleichung (0.8) zu:

$$p(x) = p_0 \exp\left(\frac{ul}{\bar{c}gh}\right) \quad (0.8)$$

$$K = \frac{n_{FV}}{n_A} = \frac{p_{FV}}{p_A} = \exp\left(\frac{uL}{\bar{c}gh}\right) \quad (0.9)$$

Um ein möglichst hohes Kompressionsverhältnis zu erreichen müssen die Länge L des Kanals und die Rotationsgeschwindigkeit u groß sein. Die Größe $g \cdot h$ ist durch die Geometrie der Pumpe vorgegeben. Für leichte Gase (z.B. H_2 oder He) ist die mittlere Geschwindigkeit groß und damit erreicht man für diese Gase ein schlechteres Kompressionsverhältnis. Der erste Entwurf von Gaede ermöglichte dabei eine Pumpleistung von 1.5 l/s.

Im Jahr 1923 erfolgte von Fernand Holweck die Weiterentwicklung dieser Idee, wie in Abbildung 0.3 gezeigt.

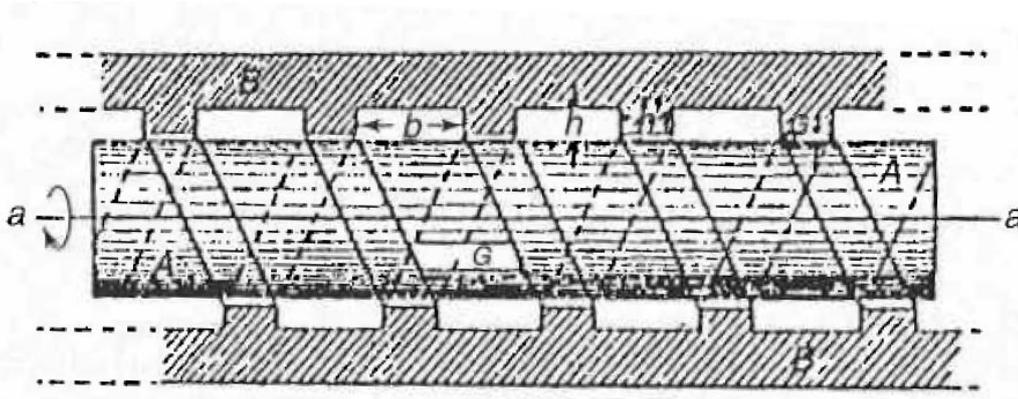


Abbildung 0.3: Pumpenentwurf nach Holweck [4] mit Rotorachse (a), Breite des Gewindes (b), Tiefe des Gewindes (h), Rotor (A) und Stator (B)

Analog zum Entwurf von Gaede dreht sich ein zylindrischer Rotor in einem zylindrischen Gehäuse. Dieses Gehäuse besitzt allerdings im Gegensatz zu Gaedes Entwurf im Innern keine glatte Oberfläche sondern ein Gewinde, wodurch L um ein vielfaches verlängert wird. Die Partikel werden wie zuvor durch die Drehung des Rotors beschleunigt und folgen den Aussparungen des Gewindes in Richtung Ausgang. Dies ermöglichte eine Erhöhung der Pumpleistung auf 6 l/s.

Willi Becker hat diese beiden Prinzipien im Jahre 1956 vereinigt und verfeinert. Mit Hilfe mehrerer hintereinander folgender Rotor- und Statorblattstufen wurde eine hohe Kompression erreicht. Unterschieden wird heute zwischen einer normalen TMP und einer „wide-range TMP“. Eine normale TMP besitzt nur abwechselnd Rotor- und Statorstufen, wohingegen eine „wide-range TMP“ zusätzlich noch eine Holweck-Stufe besitzt. Der Stator ist dabei innen am Gehäuse befestigt und bewegt sich nicht. Die Statorblätter sind in Bezug auf ihren Winkel den Rotorblättern genau entgegengesetzt ausgerichtet. Das Grundprinzip der verwendeten TMPs wird in Abbildung 0.4 genauer erläutert.

Bei der Adsorption der Teilchen auf der sich mit Überschall drehenden Rotoroberfläche erhalten sie einen zusätzlichen Impuls. Nach der Desorption der Teilchen hat die Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle dadurch eine Vorzugsrichtung in Richtung der Rotorbewegung.

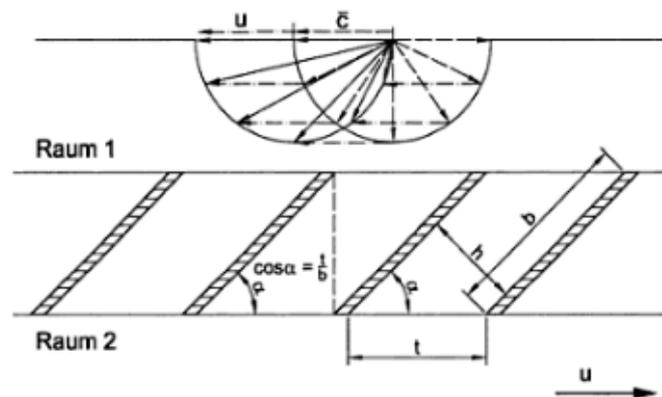


Abbildung 0.4: Funktionsweise des Rotors [4] anhand der Geschwindigkeit des Rotors (u), dem Abstand der Rotorblätter (h), der Länge der Rotorblätter (b), der Abstand der Rotorblätter in der Horizontalen (t) und dem Winkel der Rotorblätter zur Horizontalen (α)

Die Wahrscheinlichkeit für das desorbierte Teilchen von Raum 1 in Raum 2 zu wechseln ist dabei um ein Vielfaches höher als umgekehrt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Teilchen sich nach der Adsorption entsprechend ihres neuen Geschwindkeitsvektors von den Rotorblättern lösen und in Raum 2 übergehen, da diese Richtung den größten Raumwinkel aus Sicht der Teilchen darstellt.

Mit jeder Pumpstufe verringert sich der Winkel der Rotor- bzw. Statorblätter als auch das zwischen den Stufen für das Gas zur Verfügung stehende Volumen immer weiter. Aufgrund dieser Verringerung erfolgt eine zunehmende Kompression des Gases.

Damit eine TMP funktionieren kann, muss am Auslass der Pumpe ein Vorvakuumdruck im Bereich von $1 \cdot 10^{-2}$ mbar herrschen. Dieser niedrige Vorvakuumdruck verhindert, dass zu viele Teilchen vorhanden sind und den Motor durch die starke Reibung abbremsen. Der Vordruck wird durch Vakuumpumpen, wie z.B. Drehschieberpumpen, Scrollpumpen oder Kolbenpumpen erzeugt, die das Gas auf Atmosphärendruck komprimieren können. Bei leichten Gasen wie z.B. H_2 setzt man je nach Anwendung auch kaskadierte TMPs ein, um das niedrigere Kompressionsverhältnis auszugleichen.

1.2 Das Karlsruher Tritium Neutrino-Experiment

Das **Karlsruher Tritium Neutrino-Experiment (KATRIN)** mit dem die Masse von Elektronenneutrinos mit einer Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ bestimmt werden soll, befindet sich momentan am KIT, Campus Nord im Aufbau. Das Vakuum in großen Teilen des Experiments wird mit TMPs erzeugt, die in der Nähe supraleitender Magnete betrieben werden. Der sichere Betrieb der Tritiumanlage und die lange Messzeit von mehreren Jahren erfordern ein gutes Verständnis der Rotorerwärmung durch Magnetfelder und Gasfluss. Im Folgenden wird ein Überblick über die Ziele und den Aufbau des Experimentes gegeben mit besonderem Augenmerk auf dem Einsatz der TMPs.

1.2.1 Die Neutrinos

Die Erforschung des Ursprungs des Universums aus dem Urknall gehört zu den großen Herausforderungen der Wissenschaft. Es werden immense Anstrengungen unternommen die Geheimnisse der Natur zu lüften. Ein großer Schritt in diese Richtung ist die Erforschung aller Grundbausteine der Materie und speziell der Neutrinos. Unser derzeitiges Bild der Materie und der Kräfte, die zwischen ihren Bausteinen, den Elementarteilchen wirken, wird durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben. Es besteht aus Fermionen (Spin $\frac{1}{2}$), aus denen die bekannte Materie besteht, und aus Bosonen (ganzzahliger Spin), die die Kräfte zwischen den Teilchen übertragen. Die Fermionen lassen sich in drei Familien mit jeweils 4 Teilchen untergliedern. Der Aufbau des Standardmodells ist in Abbildung 0.5 dargestellt.

Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	$< 2.2 \text{ eV}$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 W weak force
Leptons				Bosons (Forces)

Abbildung 0.5: Das Standardmodell der Teilchen [5]

Die Neutrinos wurden 1930 von Wolfgang Pauli postuliert, um die rätselhafte Form des Energiespektrums der β -Elektronen zu erklären. Der β -Zerfall konnte nicht über einen Zweikörperzerfall von einem Neutron in ein Proton und ein Elektron beschrieben werden, da daraus nur Elektronen mit diskretem Energiespektrum resultieren würden. Zudem wäre bei dem Zweikörperzerfall die Drehimpulserhaltung verletzt worden. Die gemessenen Elektronen besaßen aber ein kontinuierliches Energiespektrum. Daher musste ein weiteres, neutrales Teilchen entstehen, das die Drehimpulserhaltung ermöglicht und gleichzeitig das kontinuierliche Energiespektrum erklärt. Dieses Teilchen wurde auf den Namen Neutron getauft, wurde ab später von Enrico Fermi in Neutrino umgetauft um Verwechslungen mit den neuen, zu dieser Zeit entdeckten Neutronen auszuschließen [6].

Der erste experimentelle Nachweis der Neutrinos gelang 1956 Clyde Cowan und Frederick Reines [7], die über den inversen Beta-Zerfall an einem der ersten Kernreaktoren Elektronneutrinos nachweisen konnten. Der inverse Betazerfall lässt sich wie folgt darstellen:



Kernreaktoren sind neben Atombomben, die ebenfalls in Erwägung gezogen wurden, die stärksten künstlichen Neutrinoquellen. Der Detektor bestand aus einer Cadmium-Chlorid-Lösung, die sich zwischen zwei Szintillationszählern befand und Positron und Neutron in Koinzidenz nachweisen konnte. Im Jahre 1956 wurde mit Hilfe des Goldhuber-Experiments über den Elektroneinfang bei ^{152m}Eu und dem daraus resultierenden Photon und Neutrino nachgewiesen, dass das Neutrino eine Helizität von -1 besitzt. Daraus ergibt sich, dass das Neutrino linkshändig ist und sich daher mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Da es laut der Einstein'schen Relativitätstheorie unmöglich ist, dass sich eine massebehafteter Körper mit Lichtgeschwindigkeit bewegen kann, wurde angenommen, dass das Neutrino masselos ist.

Neben den Elektronneutrinos gibt es noch zwei weitere Flavours, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino, die zur zweiten und dritten Teilchenfamilie gehören. Das Myon-Neutrino wurde 1962 mit Hilfe eines Neutronen-Strahls in einem der ersten Beschleuniger nachgewiesen [9] und das Tau-Neutrino im Jahr 2000 vom DONUT-Experiment [10].

Durch Analyse der von der Sonne emittierten Neutrinos wurde die Entdeckung von Goldhuber allerdings in Frage gestellt. Durch Verständnis der Vorgänge in der Sonne kann die Anzahl der emittierten Elektron-Neutrinos berechnet werden. Von dieser Anzahl konnten allerdings nur ca. 40% gemessen werden. Daher ist davon auszugehen, dass diese sich während dem Flug von der Sonne zur Erde in einen anderen Neutrino flavour umgewandelt haben. Diese Neutrinooszillation setzt voraus, dass die Flavoureigenzustände ν_α eine Superposition der Masseneigenzustände ν_i sind.

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (0.11)$$

wobei $U_{\alpha i}$ die Maki-Nakagawa-Sakate-Matrix darstellt. Neutrinooszillationen setzen also eine endliche Masse voraus. Dies wurde durch mehrere Experimente wie Homestake [11], Sage [12], Gallex [13], SNO [14] oder Super-Kamiokande [15] durch Analyse der von der Sonne emittierten Neutrinos entdeckt und von KamLAND [16] mit Reaktorneutrinos bestätigt.

Da die Neutrinos nur über die schwache Wechselwirkung mit Materie interagieren, ist der Nachweis schwer durchzuführen. Diese Versuche wurden meist mit Elektroneneutrinos bewerkstelligt, da diese sich am leichtesten herstellen lassen. Mit den derzeitigen Möglichkeiten konnte bisher nur die Obergrenze der Masse festgelegt werden. Beispiele für diese Versuche sind das Neutrinomassen-Experiment in Troitsk (Russland) und das Mainzer Neutrinomassenexperiment in Deutschland.

1.2.2 Motivation des KATRIN-Experiments

Neutrinooszillationen haben bewiesen, dass Neutrinos eine endliche Masse besitzen müssen. Vor allem für die Teilchenphysik wäre die Messung der Neutrinomasse ein bahnbrechendes Ereignis, da damit ein erster Beweis gegeben wäre, dass auch Theorien, die über das Standardmodell hinaus gehen, möglich sind. Ein weiteres Teilgebiet, welches stark der Neutrinomasse interessiert ist, ist die Astrophysik. Massive Neutrinos werden momentan als wahrscheinlichste Kandidaten für die relativistische Heiße Dunkle Materie gehandelt. Selbst bei einer Neutrinomasse von $3 \text{ eV}/c^2$ würden sie ca. 20% der Masse unseres Universums ausmachen. Die Messung der Masse würde somit unser grundlegendes Verständnis des Universums verbessern.

Bisher konnte nur eine Obergrenze der Neutrinomasse durch die beiden Experimente in Troitsk und Mainz festgelegt werden. Die in Troitsk gemessene Obergrenze liegt bei $m_\nu < 2,05 \text{ eV}/c^2$ (95%CL) [16], die beim Mainzer Neutrinomassenexperiment bestimmte bei $m_\nu < 2,3 \text{ eV}/c^2$ (95%CL) [18]. An diesem Punkt setzt das KATRIN-Experiment an. Das Ziel ist eine Verbesserung der Genauigkeit um den Faktor 10 auf 0,2 eV. Da die Genauigkeit mit der Größe des Spektrometers skaliert, wurde das KATRIN Hauptspektrometer mit einer Länge von 23,4 m und in der Mitte einen Durchmesser von 9,8 m konzipiert.

1.2.3 Der MAC-E-Filter¹

Der MAC-E-Filter stellt den wichtigsten Teil des KATRIN-Experiments dar. Dieser ermöglicht eine Energieanalyse der Elektronen bei hoher Luminosität und Energieauflösung. Diese neue Art der Energieanalyse wurde in Troitsk und Mainz erfolgreich eingesetzt. Das Grundprinzip ist in Abbildung 0.6 veranschaulicht.

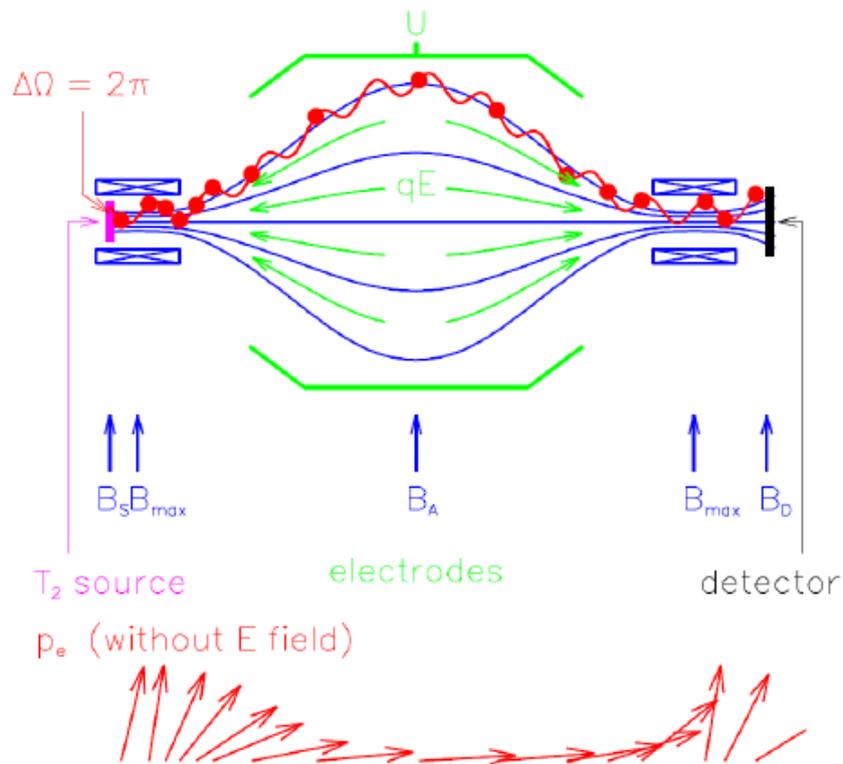


Abbildung 0.6: Funktionsweise des MAC-E-Filters

Die Tritiumquelle auf der linken Seite befindet sich in einem starken Magnetfeld. Die β -Elektronen werden adiabatisch entlang der von supraleitenden Magneten erzeugten Feldlinien durch das Spektrometer bis zum Detektor geführt. Sie werden in der Quelle isotrop emittiert und führen zyklotronartige Bewegungen um die Magnetfeldlinien aus. Die Energie der Elektronen teilt sich also in den Teil der Radialbewegung $E_r = E_0 \cos^2(\theta)$ und der longitudinalen Bewegung $E_p = E_0 \sin^2(\theta)$. Um ihre Energie messen zu können, muss eine Umformung der radialen Energie in longitudinale Energie stattfinden. Diese Umformung wird durch das stark inhomogene Magnetfeld des Spektrometers erreicht. Durch den adiabatischen Transport bleibt das magnetische Moment μ der Elektronen erhalten.

$$\mu = \frac{E_r}{B} = const. \quad (0.12)$$

¹ Magnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter

Das zur Mitte des Spektrometers hin abnehmende Feld führt zu einer Reduktion der radialen Energie und damit zu einer Zunahme der longitudinalen Komponente. Nun steckt fast die komplette Energie im Longitudinalimpuls und die Elektronen erreichen den stärksten Punkt des elektrischen Potentials. Besitzen sie genügend Energie werden sie transmittiert, andernfalls werden sie reflektiert. Die transmittierten Elektronen werden durch das elektrische Potential danach wieder auf ihre Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt und der Flussschlauch fokussiert. Der MAC-E-Filter ist somit ein Hochenergiepassfilter. Die Energieauflösung des Spektrometers wird durch die verbleibende Radialenergie beschränkt. Aufgrund der Tatsache, dass der magnetische Fluss ϕ konstant ist

$$\phi = B \cdot A = const. \quad (0.13)$$

hat die Stärke des Magnetfeldes B einen direkten Zusammenhang mit der Fläche A der Analysierebene. Daher ergibt sich für die Auflösung des Spektrometers

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_A}{B_{\max}} \approx \frac{A_{\text{Quelle}}}{A_{\text{Spektra}}} \quad (0.14)$$

Eine kleine Quelle und ein möglichst großes Spektrometer ermöglichen daher die beste Auflösung.

1.2.4 Der Aufbau

Das KATRIN-Experiment besteht aus mehreren Komponenten, die eine Länge von ca. 70m umfassen. Der Aufbau wird durch Abbildung 0.7 veranschaulicht. Die Komponenten lassen sich in zwei Bereiche unterteilen:

- (i) Im Quell- und Transportbereich (b-f) findet der β -Zerfall statt. Während die Elektronen mithilfe der Felder supraleitender Magnete verlustfrei zum Spektrometer geführt werden, entfernen verschiedene Pumpsysteme nahezu das gesamte Tritium, bevor es in den Spektrometerbereich eindringen kann.
- (ii) Im Spektrometer- und Detektorbereich (h-i) wird die Energie der Elektronen analysiert und die Anzahl der Elektronen bestimmt.

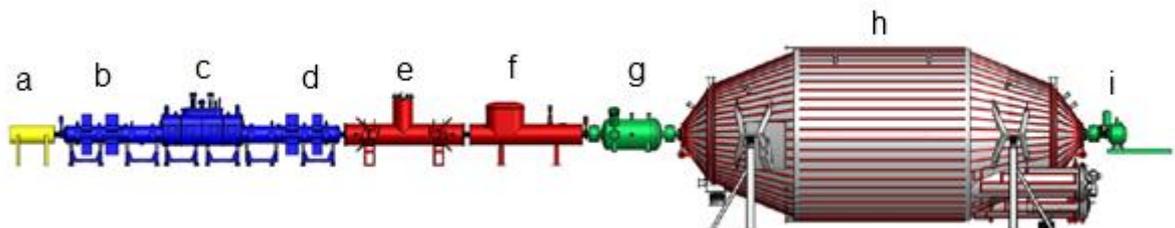


Abbildung 0.7: Das gesamte KATRIN-Experiment mit folgendem Aufbau von links nach rechts: [20]
a) Rear Section, b) DPS-1R, c) windowless gaseous tritium source (WGTS), d) DPS-1F,
e) Differentielle Pumpstrecke (DPS-2F), f) Kryogene Pumpstrecke (CPS), g) Vorspektrometer,
h) Hauptspektrometer und i) Detektor

1.2.4.1 Die „windowless gaseous tritium source“

Die „windowless gaseous tritium source“ (WGTS) dient als Einlass und Zerfallstrecke für das Tritiumgas. Das Stahlrohr ist 10m lang und hat einen Durchmesser von 90 mm. Das Tritiumgas wird in der Mitte der WGTS durch eine Injektionskammer über 250 Löcher mit einem Durchmesser von je 2 mm und einem Druck von $3,35 \cdot 10^{-3}$ mbar eingeführt. Dabei diffundiert es innerhalb 1 sec zu beiden Enden der WGTS und zerfällt mit einer Wahrscheinlichkeit von $10^{-9}\%$. Bei einer Teilchensäulendichte von $5 \cdot 10^{17}$ Teilchen/cm² führt zu einer Aktivität des Tritiums von ca. 10^{11} Bq. [19]. Um den Doppler-Effekt und damit ein Verschmieren der Elektronenenergie zu verhindern beträgt die Quelltemperatur nur 27K. Die durch den Zerfall entstehenden Elektronen werden mit Hilfe eines 3.6 T starken Magnetfeldes adiabatisch auf Zyklotronbahnen zu beiden Enden der WGTS geführt. Der dadurch erzeugte Fluss Schlauch hat einen Durchmesser von 9 cm und Stärke von 191 Tcm². An den Enden der WGTS befindet sich in Richtung der „Rear Section“ die Differentielle Pumpstrecke DPS1-R und in Richtung der Spektrometer DPS1-F. Diese mit jeweils 6 TMPs bestückten Teilabschnitte bewirken eine erste Reduzierung des Tritiumflusses und befördern 99% des Tritiums aus der WGTS heraus. Über einen internen Kreislauf wird das verbrauchte Tritium aufbereitet und wieder in die WGTS eingeleitet. Dabei wird eine Isotopenreinheit von 95% erreicht.

1.2.4.2 Die Transportstrecke

Die Transportstrecke wird zur Reduktion des Tritiumflusses auf 10^{-14} mbar·l/s benötigt, da das Tritium sonst zu einem starken Untergrund in den Spektrometern führt. Sie besteht aus der 6,5m langen Differentiellen Pumpstrecke DPS2-F und der kryogenen Pumpstrecke CPS. Die DPS2-F ist in 5 Teilstücke mit supraleitenden Magneten von jeweils 1m Länge unterteilt, welche in einem Winkel von 20° gegeneinander angeordnet sind. Dazwischen pumpen insgesamt 4 TMPs das Tritiumgas ab. Die DPS2-F ermöglicht den adiabatischen Transport der Zerfallselektronen und reduziert den Tritiumfluss aus der WGTS bis zur CPS um den Faktor 10^5 .

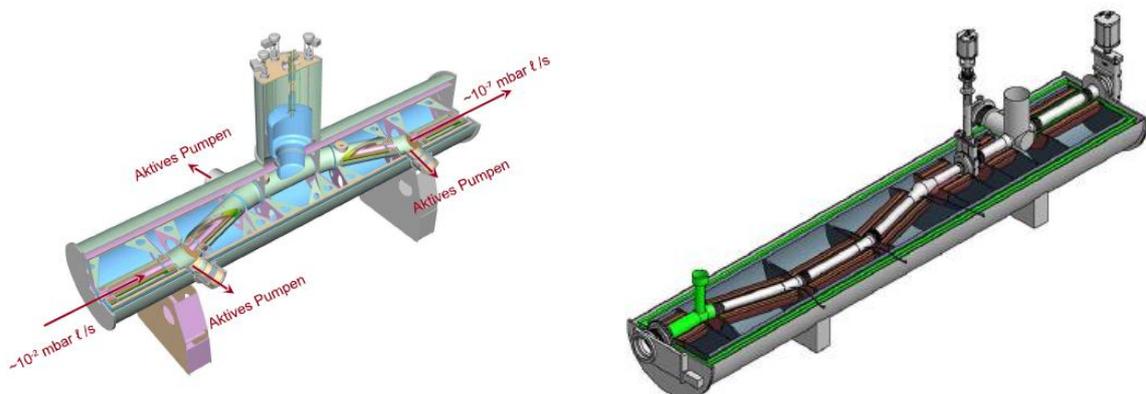


Abbildung 0.8: links die DPS2-F und rechts die CPS [21]

Der adiabatische Transport wird durch fünf supraleitende Magnete ermöglicht, die ein Magnetfeld von 5,6 T erzeugen. Die Innentemperatur in der DPS2-F beträgt 77K. Damit wird die Leitfähigkeit des Strahlrohrs herabgesetzt und die Pumpleistung erhöht. Die Magnete werden mit flüssigem Helium gekühlt und unterhalb ihrer Sprungtemperatur gehalten. In den mittleren Teilstücken sind zusätzlich noch Dipolelemente eingesetzt, die die beim Tritiumzerfall entstehenden Ionen ausleiten. An den Übergängen der Teilstücke befindet sich jeweils ein Pumpport mit einer TMP, die eine Pumpleistung von 2000 l/s für N₂ besitzt.

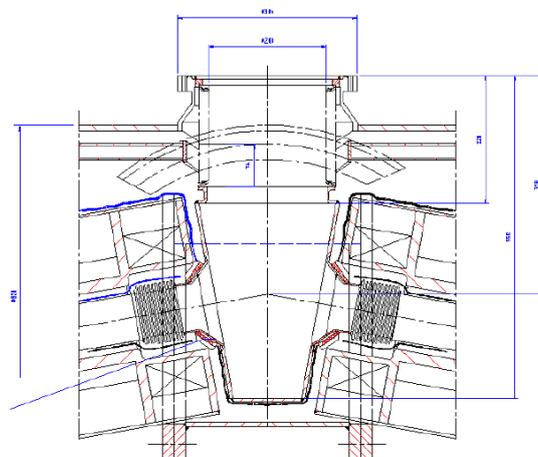


Abbildung 0.9: Pumpport am Übergang zwischen zwei Teilen der DPS2-F [19]

Durch das Anwinkeln der Streckenteile um 20° kommt es zur Erhöhung der Pumpwahrscheinlichkeit des Tritiums durch die TMPs. Den Teilchen wird dadurch die Möglichkeit genommen, geradewegs die Pumpports der DPS2-F zu passieren. Das abgepumpte Tritium wird in einem geschlossenen Kreislauf zu einem Palladium-Membran-Filter geführt. Dort wird es in zerfallenes ³He und Tritium gefiltert. Das unverbrauchte Tritium wird wieder in die WGTS eingespeist, das zerfallene Tritium wird wieder aufbereitet und über die WGTS eingeleitet. Da die TMPs so nah wie möglich am Stahlrohr positioniert sind, sind sie dem angelegten Magnetfeld ausgesetzt (siehe Abbildung 0.10). Dieses erzeugt Wirbelströme in den TMPs, die zu einer Erhitzung des Rotors führen. Nachfolgend die simulierte Magnetfeldverteilung.

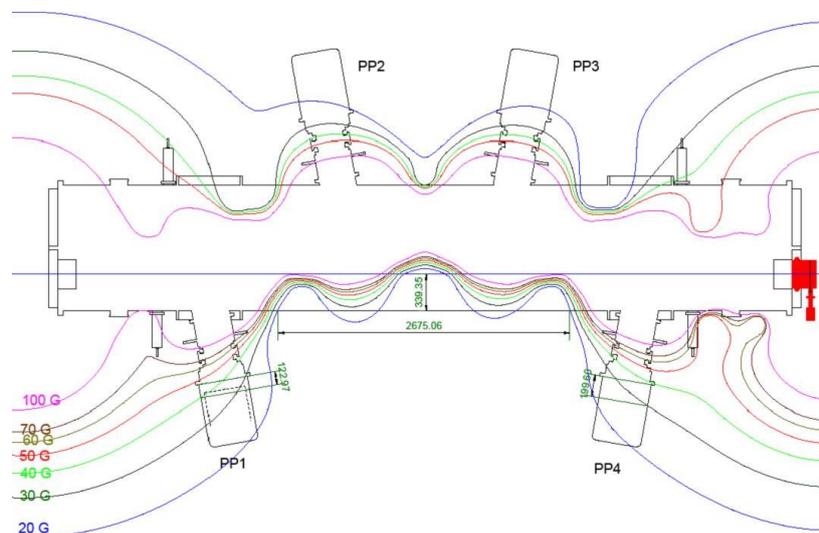


Abbildung 0.10: Magnetfeldverteilung anhand der Ummantelung der DPS2-F mit den vier Pumpports [22]

Mit Hilfe der DPS2-F sind die Grenzen der mechanischen Vakuumerzeugung erreicht. Daher schließt sich die Cryogene Pumpstrecke (CPS) am Ende der DPS2-F an. Die CPS funktioniert nach dem Prinzip der Cryoadsorption und wird mit Hilfe von flüssigem Helium auf eine Temperatur von 4.5K gekühlt. Zur Erhöhung der Adsorptionsrate wird eine Schicht aus Argonschnee auf der inneren Oberfläche aufgebracht. Das führt zu einer Absorptionsmenge von 10^{17} Teilchen pro Tag. Die CPS muss alle 60 Tage mit warmem Helium gespült werden, wenn die Tritiumbelegung der Wände 1 Ci erreicht hat.

Auch hier gibt es eine Anwinkelung der einzelnen Teilstücke um 20° um einen direkten Tritiumfluss in die Spektrometer zu verhindern. Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme sind vor und hinter der CPS Ventile eingebaut, um zu verhindern, dass bei einem Abschmelzen Tritium in die Spektrometer gelangt.

1.2.4.3 Die Spektrometer

Der Spektrometerbereich umfasst zwei hintereinander geschaltete MAC-E-Filter, das Vor- und das Hauptspektrometer.

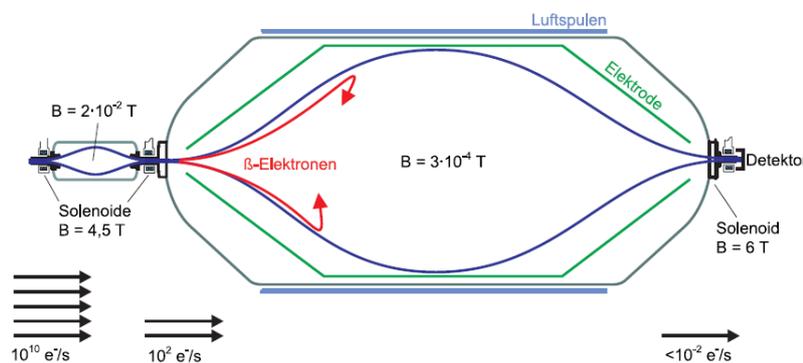


Abbildung 0.11: Das Vor- und das Hauptspektrometer mit den entsprechenden vorherrschenden Magnetfeldern und Elektronenfluss [20]

1.2.4.3.1 Das Vorspektrometer

Um den Untergrund im Hauptspektrometer zu reduzieren, der durch Teilchenkollisionen von Elektronen mit Restgasmolekülen entsteht, erfolgt eine erste Filterung durch den MAC-E-Filter im Vorspektrometer, die den Elektronenfluss um 7 Größenordnungen reduziert. Es hat eine Länge von 3,38 m und in der Mitte einen Durchmesser von 1,70 m. Supraleitende Spulen an beiden Enden erzeugen ein Magnetfeld mit einer Stärke von 4,5 T. In der Mitte beträgt die effektive Feldstärke noch 27 mT. Daraus resultiert eine Energieauflösung von $\Delta E = 100 \text{ eV}$. Die Spannung von -18.3 kV wird direkt an die Spektrometerhülle angelegt und bewirkt eine Reduktion des Elektronenflusses von $10^{10} \text{ e}^-/\text{s}$ auf $10^4 \text{ e}^-/\text{s}$. Elektronen mit einer Energie unter 18,3 keV werden herausgefiltert, da sie keine Informationen über die Neutrinomasse enthalten.

Im Inneren sind entlang der Spektrometerwand mehrere Drahtelektroden angebracht, die über die ganze Länge verlaufen. Sie dienen zur Feinformung des retardierenden Potentials und zur elektrostatischen Reflektion der z.B. durch kosmische Strahlung in der Tankwand erzeugten Elektronen.

Im Vorspektrometer herrscht ein Druck von 10^{-11} mbar, dieser wird von TMPs und einer NEG-Pumpe erzeugt. Bei einer NEG-Pumpe handelt es sich um eine Adsorptionspumpe. Sie besteht aus chemisch reaktiven Materialien, welche mit den restlichen im Vakuum vorhandenen Teilchen reagieren und sie binden. Es gibt zwei Pumpports, einen Horizontalen und einen im 45° -Winkel angebrachten. Am Horizontalen sind zwei TMPs mit ein einer Pumpleistung von je 1300 l/s für N_2 angebracht, während sich im anderen eine NEG-Pumpe mit einer Leistung von 20000 l/s für H_2 befindet. Die TMPs werden dabei in einem Feld von 3 mT betrieben.

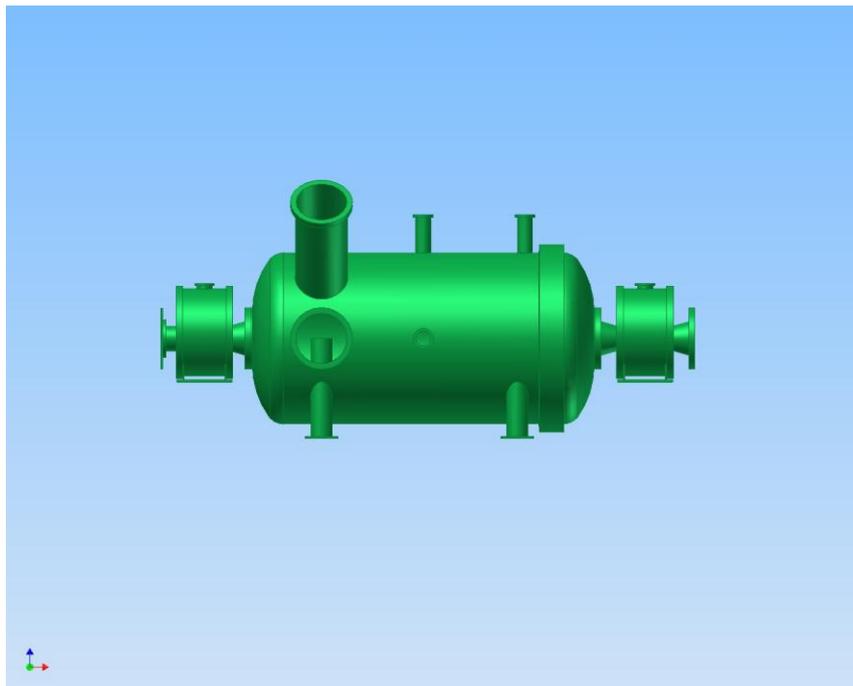


Abbildung 0.12: Das Vorspektrometer mit einer Länge von 3,38 m und einem Durchmesser in der Mitte von 1,70 m

1.2.4.3.2 Das Hauptspektrometer

Nachdem bereits im Vorspektrometer eine erste Reduktion stattgefunden hat, erfolgt der zweite Schritt mit viel größerer Genauigkeit im Hauptspektrometer. Das Hauptspektrometer ist 23,3 m lang und hat einen Durchmesser von 9,8 m in der Mitte. Wie das Vorspektrometer arbeitet auch das Hauptspektrometer als MAC-E-Filter. Dafür wird ein Magnetfeld mit einer Stärke von 4,5 T am Ein- und 6 T am Ausgang des Spektrometers angelegt. Da der daraus resultierende Flussschlauch die Wände des Spektrometers berühren würde, wird ein zusätzliches durch Luftspulen erzeugtes Magnetfeld verwendet. Dieses ermöglicht die Komprimierung des Flussschlauches auf einen Durchmesser von 9 m in der Mitte bei einem Feld von 0,3 mT. Zudem dient das von den Luftspulen erzeugte Magnetfeld noch zur Kompensation des Erdmagnetfeldes.

Es ergibt sich eine Energieauflösung von $\Delta E = 0,93$ eV bei 18,6 kV, die im Vergleich mit anderen MAC-E-Filtern um den Faktor 5 besser ist. Wie bereits im Vorspektrometer sind auch hier Drahtelektroden an der Innenwand des Spektrometers zur Feinformung des elektrischen Potentials und Reflektion von Untergrundelektronen befestigt. Da diese Retardierungsspannung im ppm-Bereich konstant sein muss, wird das ehemalige Mainzer Spektrometer als Monitor-Spektrometer betrieben. Es wird durch dieselbe Spannungsquelle versorgt wie das Hauptspektrometer. Über die Messung der Peak-Position von ^{83m}Kr Konversionselektronen wird die Spannungstabilität überwacht. Zur Erzeugung eines Vakuums im Bereich von 10^{-11} mbar wird eine sehr hohe Pumpleistung benötigt, wobei die Pumpleistung hauptsächlich zur Beseitigung der ausgasenden H_2 -Teilchen benötigt wird. Das reine Abpumpen der Gase wird mit Hilfe von TMPs und NEG-Pumpen bewerkstelligt, die sich über drei Pumpports verteilen. Am mittleren Pumpport befindet sich nur eine NEG-Pumpe, die beiden äußeren Pumpports enthalten jeweils eine NEG-Pumpe, drei TMPs mit einer Leistung von 2800 l/s, eine kaskadierende TMP mit einer Leistung von 300 l/s und eine Vorpumpe. Die Anordnung der Pumpports ist in Abbildung 0.13 zu sehen. Das Magnetfeld im Bereich der der TMPs beträgt maximal 1,5 mT.

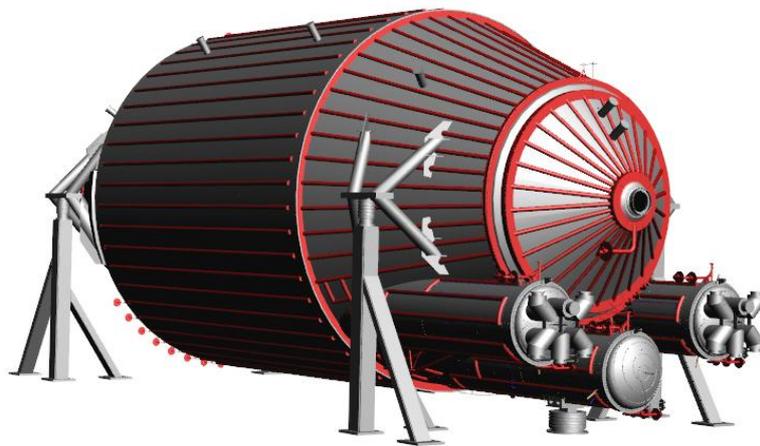


Abbildung 0.13: Position der Pumpports am Hauptspektrometer (von links nach rechts P2, P1, P3). Die Länge des Hauptspektrometers beträgt 23,3 m, der Durchmesser 9,8 m.

Die TMPs dienen im Normalbetrieb größtenteils zum Abpumpen von Edelgasen und haben eine Pumpleistung von 10^4 l/s. Die NEG-Pumpen sind für Wasserstoff zuständig und haben eine Pumpleistung von 10^6 l/s. Die Anzahl der verwendeten TMPs hängt maßgeblich von der Menge des ausströmenden Wasserstoffs ab, der bei der Aktivierung der NEG-Pumpen entsteht. Zur Verringerung der Ausgasung von Wasserstoff auf 10^{-12} mbar·l/s·cm² bei Raumtemperatur und dem Entfernen von Wasser wird das Hauptspektrometer bei 350°C ausgeheizt.

1.2.4.4 Der Hauptdetektor

Die Elektronen mit einer Energie über dem Retardierungspotential müssen, nachdem sie das Spektrometer verlassen, noch gezählt werden. Dazu ist hinter dem Hauptspektrometer der Hauptdetektor angebracht. Dieser Detektor ist ein PIN-Dioden-Array auf Silizium-Basis. Am Detektor wird ein Magnetfeld von 3 T angelegt, welches den knapp 9 m breiten Flussschlauch des Hauptspektrometers auf 9 cm komprimiert. Der Detektor hat einen Durchmesser von 9 cm, um den Flussschlauch von 191 T pro cm^2 abdecken zu können. Die Vorderseite des Detektors ist dabei eine n^{++} -dotierte Schicht gefolgt von einer n -dotierten Schicht. Die Rückseite besteht aus 148 gleichgroßen Pixeln mit 41.1 mm^2 Fläche aus p -dotiertem Material. Angeordnet sind die Pixel in 12 Ringen mit jeweils 12 Segmenten und 4 zentralen Pixeln, wie in Abbildung 0.14 veranschaulicht.



Abbildung 0.14: Die Detektoroberfläche mit den verschiedenen Pixeln [20]

Durch diesen Aufbau werden Elektronenenergien im Bereich von 5 keV bis 50 keV detektiert und dabei eine Energieauflösung von aktuell 1,4 keV erreicht. Die hohe Sensitivität des Detektors führt durch äußere Einflüsse, wie natürlicher Radioaktivität oder kosmischer Strahlung zu weiteren Untergrundbeiträgen. Um diese soweit wie möglich zu verringern wird eine Abschirmung aus Blei und Kupfer angebracht.

1.2.4.5 Das Calibration and Monitoring System (CMS)

Das so genannte CMS befindet sich am hinteren Ende des KATRIN-Experiments und schließt damit das gesamte Experiment physikalisch und elektrisch ab. Sie hat verschiedene Aufgaben. Die Überwachung der Quellaktivität wird mit Hilfe der „Rear Wall“ durchgeführt. Dieser mit Goldfolie bedampfte Abschluss der WGTS ermöglicht über die Bremsstrahlung, die beim Auftreffen von Elektronen an der Goldfolie erzeugt wird, einen Rückschluss auf die Quellaktivität zu ziehen. Weiterhin wird sie noch gebraucht um das Quellpotential zu definieren und aufrechtzuerhalten. Eine monoenergetische winkelselektive Elektronenkanone erlaubt die Untersuchung der Tritiumsäulendichte in der Quelle, der Transporteigenschaften durch das Spektrometer, der Detektorkalibration und einiger anderer Parameter.

1.2.4.6 Betriebsbedingungen der TMPs bei KATRIN

TMPs kommen sowohl bei der DPS1, der DPS2 als auch bei den beiden Spektrometern zum Einsatz. Dabei sind sie sowohl Tritium, als auch einem konstanten Magnetfeld ausgesetzt. Das auf die TMPs wirkende Magnetfeld hat an der DPS2 die größte Stärke und liegt im Bereich von 3,2 mT. Es muss also die Stabilität und die Rotortemperaturerhöhung bei Feldern dieser Stärke untersucht werden.

1.3 Einsatz von TMPs bei Fusionskraftwerken

Ein aktuelles und sehr wichtiges Forschungsgebiet, bei dem TMPs zum Einsatz kommen, ist die Fusionsenergie. Es gibt zurzeit viele verschiedene Projekte um einen funktionierenden Fusionsprozess zu verwirklichen. Im Folgenden wird eine Übersicht über die Anwendung der TMPs und die Funktionsweise von Fusionsreaktoren am Beispiel des JET-Experiments gegeben.

Grundlegend für den Fusionsprozess ist das Erreichen des Schwellenwertes bei dem Tritium und Deuterium fusionieren. Bei JET wird ein Gasgemisch aus Deuterium und Tritium mit einer Plasmatemperatur von 10^8 °C verwendet. Bei der Umwandlung des Gasgemisches in Plasma werden die Elektronen abgespalten. Die Atome bestehen nur noch aus Protonen und Neutronen. Beim Erreichen des Lawson-Kriterium [2], das den Grenzwert des Produktes aus Plasmadichte und Einschlußdauer angibt, am dem Deuterium und Tritium zu Helium fusionieren findet folgende Reaktion statt:



Die freiwerdende Energie wird zu einem großen Teil auf das Neutron (14,1 MeV) und nur zu einem kleineren Teil auf das Helium-Atom (3,5 MeV) übertragen. Während der He-Kern seine Energie über Stöße an das Plasma abgibt und so für die Aufrechterhaltung der Plasmatemperatur verantwortlich ist, verlässt das Neutron das magnetische Führungsfeld und gibt seine Energie in der Wand als nutzbare Wärme ab.

Die Kriterien für den Betrieb einer andauernden Kernfusion wurden bereits 1955 von John D. Lawson untersucht. Durch Gleichsetzen der Verlustleistung mit dem Leistungsgewinn und unter der Annahme, dass die Anzahl der Tritium- und Deuterium-Teilchen gleich sind, lassen sich die Randbedingungen des Prozesses festlegen.

Die Verlustleistung berechnet sich über

$$P_v = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle \varepsilon V \quad (0.16)$$

mit der Tritium-Teilchendichte n_1 , der Deuterium-Teilchendichte n_2 , dem über die Maxwell-Verteilung gemittelten Produkt aus dem Wirkungsquerschnitt und der Gasgeschwindigkeit $\langle \sigma v \rangle$, der pro Fusion freiwerdenden Energie ε und dem Plasmavolumen V .

Der Leistungsgewinn ergibt sich durch

$$P_g = \frac{3n_e k_b T}{\tau_e} V \quad (0.17)$$

Eine andere Art der Erhitzung des Plasmas erfolgt über Radiowellen. Die Elektronen und Ionen bewegen sich in Kreisbewegungen um die Magnetfeldlinien innerhalb des Plasmas. Es ist möglich bei Kenntnis der Zyklotronfrequenz, mit Hilfe an der Innenseite angebrachter Antennen, weitere Energie zuzuführen oder diese zu erniedrigen. Das Plasma wird mit einer Frequenz zwischen 23 MHz und 57 MHz bestrahlt und somit durch Resonanz erhitzt. Die daraus entstehende Wärmeleistung beträgt 32 MW.

Die wichtigste Hitzequelle ist das durch Kernfusion entstehende Helium. Sobald der Punkt der Schwellenleistung erreicht ist, sollte die Energie die im Helium gespeichert ist reichen, um den Fusionsprozess ohne weitere Erhitzung von außen am Laufen zu halten.

1.3.1 Der Tokamak

Alle diese vorgestellten Abläufe finden bei JET im so genannten Tokamak statt, der in Abbildung 0.16 gezeigt ist.

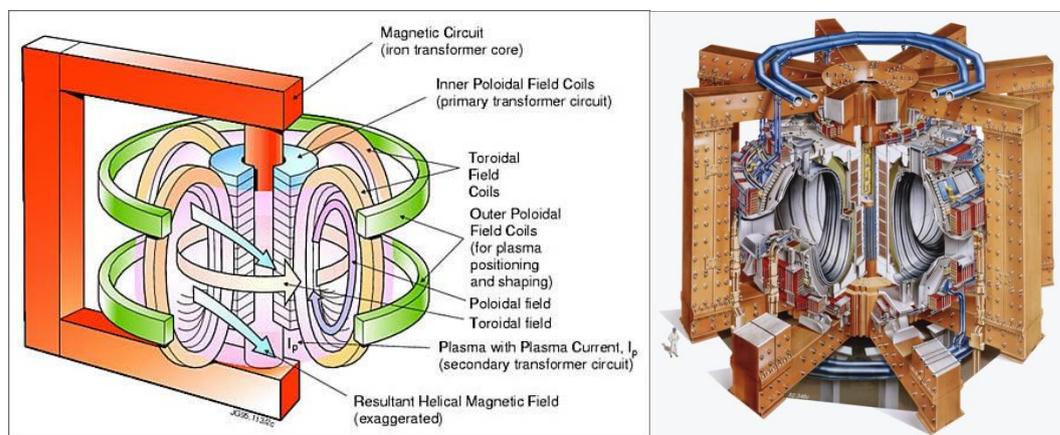


Abbildung 0.16: Überblick über den Tokamak [2]

Im Innern des Tokamak fließt das Plasma kreisförmig um den Kern der Anordnung. Um diesen Fluss aufrechtzuerhalten und vor allem um das Plasma von den Wänden fernzuhalten, sind mehrere Magnetspulen sowohl um den Flusskanal, als auch senkrecht zu diesem aufgebaut. Ohne diese Spulen würde das Plasma in Kontakt mit den kalten Wänden kommen und damit viel Energie durch Konvektion verlieren. Auch das Vorhandensein eines Hochvakuums ist von größter Wichtigkeit, da durch Verunreinigungen viel Energie durch Kollisionen verloren gehen würde. Durch Ausleitung der fusionierten Heliumkerne und die Einleitung von weiterem Plasma wird die Dichte aufrecht erhalten. Die Einleitung erfolgt über das Einbringen von gefrorenen Tritium-Deuterium-Pellets, die auf eine Geschwindigkeit von etwa 1000 m/s beschleunigt und dann in das Plasma geschossen werden. Die Ausleitung erfolgt über Hilfsmagnetfelder die die Heliumkerne und evtl. Verunreinigungen aus den Wänden gegen Prallplatten lenken. Durch diese Kollision wird die Ladungsneutralität wiederhergestellt und die nun neutralen Atome durch Cryopumpen und zum Teil durch TMPs abgesaugt. Am unteren Teil des Tokamaks wird ein sehr gutes Vakuum benötigt. Da dort das Plasma direkt vorbeiläuft, werden hier Cryopumpen eingesetzt. Die TMPs werden hier hauptsächlich für das grundsätzliche Vakuum im Tokamak und einigen Diagnostiksystemen gebraucht.

1.3.2 Das Blanket

Die Neutronen verlassen den Tokamak durch die Wände und erreichen das den Tokamak umgebende Blanket, welches in Abbildung 0.17 dargestellt ist.

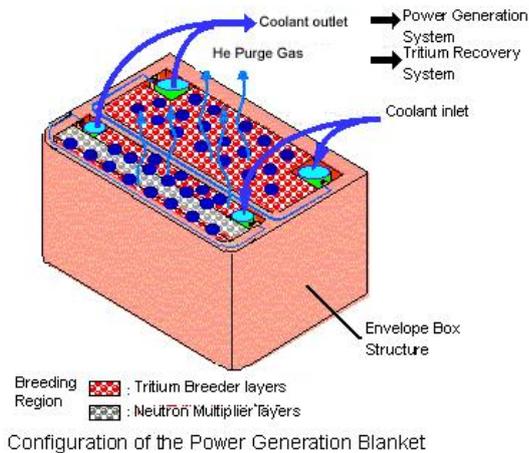


Abbildung 0.17: Querschnitt des Blankets und Veranschaulichung der darin stattfindenden Vorgänge [23]

Das Blanket hat mehrere Aufgaben:

- Energieerzeugung
Im Blanket geben Neutronen ihre kinetische Energie durch Stöße ab. Die freiwerdende Energie wird über ein Kühlmittel abgeführt, mit welchem Wasser erhitzt wird, sodass Dampfturbinen betrieben werden können.
- Erzeugung von Tritium
Tritium kommt nicht als natürliches Element vor. Es wird im Blanket durch Neutroneneinfang aus Lithium erzeugt. Das Tritiumgas wird mit dem ebenfalls entstehenden Helium und zusätzlich mit einem permanenten Heliumspülgasfluss abgeleitet.
- Abschirmung
Zum Schutz vor Neutronenstrahlung wird das Blanket auch als Abschirmung verwendet.

1.3.3 Betriebsbedingungen der TMPs bei JET

JET wird nicht kontinuierlich betrieben, sondern im Pulsbetrieb. Darum müssen TMPs vor allem mit starken gepulsten Magnetfeldern zurechtkommen. Diese Felder führen zu einer Erhitzung des Rotors durch Wirbelströme, aber auch zu einer starken Belastung der Rotorstabilität. Diesbezüglich wurden mehrere Messungen durchgeführt, welche in Kapitel 4 zu finden sind.

2 Modell zur Beschreibung der Rotortemperatur

Der Betrieb von KATRIN und JET ist ohne Magnetfelder und Gasflüsse nicht möglich. Das Anlegen von starken Magnetfeldern und/oder großen Gasflüssen an eine TMP führt jedoch zu einer starken Erwärmung des Rotors. Bei zu großer Temperatur ist die thermische Ausdehnung des Rotors größer als der Abstand zum Stator. Dadurch kommt es zu einer Kollision und damit zur Zerstörung der Pumpe.

Darum wurden zwei empirische Modelle entwickelt, mit denen die Wärmeentwicklung des Rotors bei verschiedenen Magnetfeldern und Gasflüssen möglichst genau berechnet werden kann.

Die Modelle basieren auf der Summe der einzelnen Leistungsbeiträge P_i , die die Rotortemperatur T_r beeinflussen. Diese lassen sich über folgende Formel beschreiben:

$$m_R \cdot c \cdot \frac{dT_r}{dt} = \sum_{i=0}^5 P_i = m_r \cdot c \cdot \sum_{i=0}^5 k_i f_i \quad (2.1)$$

wobei m_r die Rotormasse und c die spezifische Wärmekapazität des Rotormaterials² sind. Die einzelnen Leistungsbeiträge werden über die pumpenspezifischen Konstanten k_i und die Funktionen f_i , die den physikalischen Prozess beschreiben, parametrisiert.

Das erste Modell verwendet u.a. die Magnetfeldstärke und den Gasfluss durch die Pumpe. Das zweite Modell benutzt den Motorstrom, da dieser die abbremsende Wirkung durch Magnetfeld und Gasfluss ausgleicht um den Rotor auf konstanter Frequenz zu halten.

Beide Modelle sind darauf ausgerichtet zur Bestimmung der Rotortemperatur nur wenige Messwerte zu benötigen und auf eine minimale Anzahl von Parametern zurückzugreifen um die Berechnung möglichst einfach zu halten.

Nachfolgend werden die für die Temperaturerhöhung zuständigen Effekte und der Aufbau der Modelle genauer erläutert.

² Bei der MAG W 2800 besteht der Rotor aus 7 kg Aluminium und 4,3 kg Stahl. Die zugehörigen Wärmekapazitäten sind: Aluminium $c_A=0,9$ J/g·K und Stahl $c_S=0,45$ J/g·K

2.1 Erhitzung des Rotors durch Wirbelströme

Die Rotoren der TMPs sind in der Regel aus Aluminium hergestellt und drehen sich mit Geschwindigkeiten von 28000 rpm bis 72000 rpm, was zu dazu führt, dass die Spitzen der Rotorblätter sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegen. Wird eine TMP in einem externen Magnetfeld betrieben, kommt es durch die schnelle Drehung des Rotors zur Induzierung von Wirbelströmen und damit zu einer Erhitzung. Die Wirbelströme bewegen sich dabei wie in Abbildung 2.1 veranschaulicht, davon ausgehend, dass die Rotationsrichtung am südlichen Pol in die Bildebene zeigt.

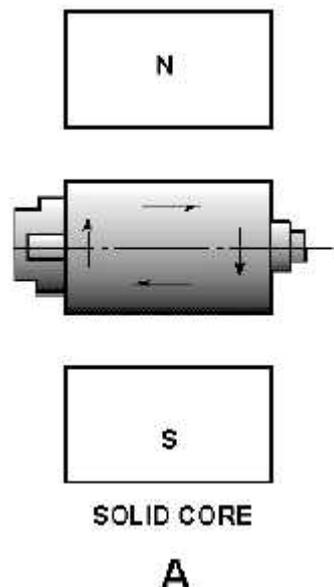


Abbildung 2.1: Wirbelströme in einem Rotor bei Rotation [5]

Die Herkunft des Wirbelstroms ist auf ein zeitlich veränderliches Feld bzw. ein inhomogenes Feld zurückzuführen. Im Rotor befindet sich bei der TMP kein homogenes Feld, da die Feldlinien nur eine endliche Eindringtiefe besitzen. Das angelegte Magnetfeld führt durch die Lenz'sche Regel zu einer Kraft auf die Elektronen. Die Elektronenbewegung erzeugt wiederum ein Magnetfeld, das dem angelegten Feld entgegengesetzt ist. Es kommt zu einer Abbremsung des Rotors, die durch eine Erhöhung des Motorstroms ausgeglichen werden muss. Dieses Phänomen bietet die Grundlage für Wirbelstrombremsen.

Bei einer TMP führt es dazu, dass abhängig von der Stärke des Magnetfeldes, die Rotorfrequenz bei Erreichen der maximalen Motorstromstärke nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Falls sich das Magnetfeld B , die von dem Magnetfeld durchströmte Fläche A oder der Winkel der Fläche zum Magnetfeld φ zeitlich ändern kommt es zu einer Veränderung des magnetischen Flusses $\phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = B \cdot A \cdot \sin(\varphi)$.

Dies führt über $U = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int B dA$ zur Induzierung einer Spannung, die die Entstehung eines Magnetfeldes bewirkt, das dem angelegten entgegen wirkt.

Die Berechnung der aus dem Magnetfeld resultierenden Bremskraft erfolgt über die Lorentzkraft:

$$F = q \cdot (v \times B) = q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\varphi) = I \cdot d \cdot B \cdot \sin(\varphi) \quad (2.2)$$

wobei q die Ladung, v die Geschwindigkeit des Leiters, d die Länge des Leiters und I die induzierte Stromstärke darstellt. Zudem wurde benutzt, dass sich das Produkt aus Ladung q und Geschwindigkeit v über den Strom I und den Durchmesser d darstellen lassen.

Die Erhitzung des Rotors wird durch Bewegung der Elektronen und dem endlichen Widerstand des Rotors bewirkt. Zur Bestimmung dieser Verlustleistung müssen mehrere Faktoren in Betracht gezogen werden. Hierbei ist die Dicke des durchströmten Leiters maßgebend. Dies zeigt sich vor allem bei Transformatoren, deren Eisenkerne in mehreren voneinander isolierten Einzelblechen gefertigt werden, um den Widerstand hoch und damit die Verlustleistung gering zu halten.

Für kleine Frequenzen erfolgt die Berechnung der Verlustleistung über $P=U \cdot I=U^2/R$. Damit ergibt sich für die Leistung eine quadratische Proportionalität zur zeitlichen Veränderung des magnetischen Flusses, die wiederum vom angelegten Magnetfeld B und der Frequenz f abhängt. Die Verlustleistung lässt sich über $P=B^2 f^2 A^2/R$ berechnen. Es ist davon auszugehen, dass eine quadratische Abhängigkeit der Frequenz zur Verlustleistung besteht. Da die TMPs sich mit bis 72000 rpm drehen, muss jedoch der Skin-Effekt berücksichtigt werden. Dies wird durch den Versuch von N. Ogiwara et al. [25] bestätigt. Für die korrekte Berechnung der Verlustleistung muss die Eindringtiefe in einem metallischen Leiter berücksichtigt werden. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der Rotor ein massiver Aluminiumblock ist, der sich um die x -Achse dreht und ein Magnetfeld in y -Richtung anliegt, wie in Abbildung 2.2 gezeigt. Die nachstehenden Formeln stammen aus [26].

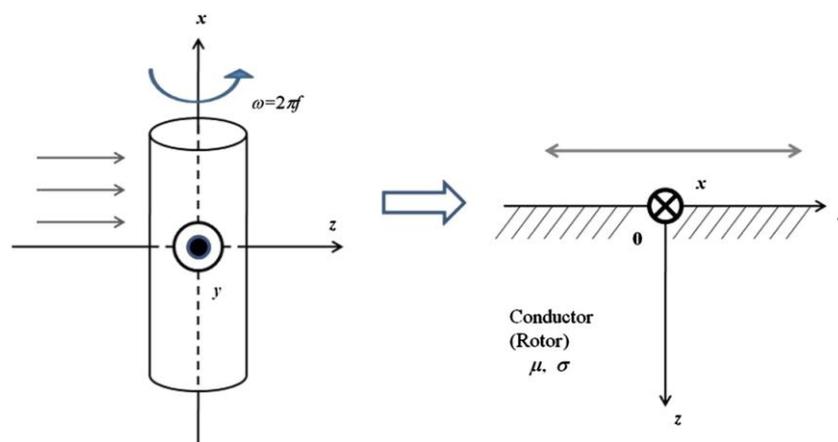


Abbildung 2.2: Rotor als Zylinder mit verwendeten Achsen, links dargestellt im Laborsystem ($B=(0,0,B_0)$) und rechts im sich mitbewegenden System ($E_x(z,t)$ $B_y(z,t)$) [25]

Ausgehend von einem räumlich konstanten, aber zeitlich veränderlichen Magnetfeld wird der Ansatz $B_y(t) = \cos(\omega \cdot t)$ benutzt, wobei ω für die Kreisfrequenz steht und t für die Zeit. Durch Umstellen der Maxwell-Gleichungen und verwenden von $B=\nabla \times A$ lässt sich folgende Diffusionsgleichung erstellen: $\Delta A = \mu \cdot \sigma \cdot \partial A / \partial t$. Diese Gleichung ist bei einer räumlichen und frequenzunabhängigen Leitfähigkeit auch für B gültig.

Da die Diffusionsgleichung eine Ortsableitung zweiten Grades und eine zeitliche Ableitung ersten Grades besitzt, bietet es sich an den Ansatz $B_y(t) = \cos(\omega t)$ in die komplexe Schreibweise zu überführen und damit $B_y(z, t) = h(z) \exp(-i\omega t)$ zu erhalten. Die Ortsabhängigkeit der Gleichung folgt aus den Grenzwerten, da das Magnetfeld für z gegen unendlich endlich bleiben muss.

Das Einsetzen des Ansatzes in die Diffusionsgleichung ergibt $\left(\frac{d^2}{dz^2} + i\mu\sigma\omega\right)h(z) = 0$.

Zur Lösung dieser Gleichung wird $h(z) = \exp(ikz)$ verwendet, woraus folgende

Beziehung resultiert $k = \pm\sqrt{i\mu\sigma\omega} = \pm(1+i)\sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}$. Aus dieser Formel ergibt sich die

Eindringtiefe zu $\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu}}$.

Die allgemeine Lösung von B_y stellt sich mit Hilfe der zuvor erstellten Berechnungen über den Real- und Imaginärteil dar.

$$B_y(z, t) = D \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \exp\left(i\left(\frac{z}{\delta} - \omega t\right)\right) + E \exp\left(\frac{z}{\delta}\right) \exp\left(-i\left(\frac{z}{\delta} + \omega t\right)\right) \quad (2.3)$$

D und E sind hier komplexe Zahlen. Da für $z \rightarrow \infty$ ein exponentielles Anwachsen des Terms stattfinden würde, muss $E=0$ gesetzt werden. Der Vergleich mit dem Randwert $B_y(0, t) = B_0 \exp(i\omega t)$ ergibt schließlich für $z > 0$

$$B_y(z, t) = B_0 \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cos\left(\frac{z}{\delta} - \omega t\right) \quad (2.4)$$

Das daraus resultierende Elektrische Feld beträgt

$$E_x = -\frac{1}{\sigma} \frac{\partial B_y}{\partial z} = \frac{\mu\omega\delta}{\sqrt{2}} B_0 \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \cos\left(\frac{z}{\delta} - \omega t\right) \quad (2.5)$$

Um die Leistung pro Volumeneinheit zu erhalten wird das zeitlich gemittelte Produkt aus Stromdichte j und elektrischem Feld E verwendet.

$$P_R = \langle jE \rangle = \frac{1}{2} \mu\omega B_0^2 \exp\left(-\frac{2z}{\delta}\right) \quad (2.6)$$

Eine Integration über das durchflossene Gebiet von $z=0$ bis z_0 ergibt

$$P = \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu\omega}{\sigma}} B_0^2 (1 - \exp(-\sqrt{2\mu\omega\sigma} z_0)) \quad (2.7)$$

Ist die Eindringtiefe klein im Vergleich zum Radius des Rotors gilt:

$$P = \text{const.} \cdot \sqrt{\omega} \cdot B_0^2 \quad (2.8)$$

Wird nun die Frequenz als konstant angenommen führt dies zu

$$\frac{P}{m \cdot c} = k_1 \cdot B_0^2 \quad (2.9)$$

Es zeigt sich eine quadratische Abhängigkeit zum angelegten Magnetfeld B und zur Wurzel aus der Kreisfrequenz. Die Verluste durch Wirbelströme werden durch $k_1(T_r)B^2$ im Modell berücksichtigt. Die Größe $k_1(T_r)$ beinhaltet in diesem Fall sowohl die Frequenz als auch andere material- und pumpenspezifische Parameter wie Eindringtiefe, Fläche und temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit.

Die Temperaturabhängigkeit wird durch den linearen spezifischen Widerstandskoeffizienten von Aluminium berücksichtigt ($3,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ bei 20°C). Die Leitwertkorrektur lässt sich über den Faktor $1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ berücksichtigen. Damit folgt für den magnetfeldabhängigen Leistungsbeitrag

$$\frac{P}{m \cdot c} = \frac{k_1 B^2}{1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{K} (T_r - 293,15K)} \quad (2.10)$$

2.2 Gasfluss

Durch die hohe Geschwindigkeit des Rotors kommt es infolge der Teilchenkollisionen zu einem Wärmeübertrag durch Reibung und Konvektion. Der Einfluss dieser Faktoren ist abhängig von der Kompression des Gases und damit von der Teilchendichte. Während im oberen Teil der TMPs noch eine geringere Kompression herrscht, nimmt diese im unteren Teil immer weiter zu und mit ihr der Effekt von Reibung und Konvektion. In den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 folgt ein Überblick über die physikalischen Hintergründe und ihren Beitrag zum Modell.

2.2.1 Gasreibung

Um die Gasreibung zu definieren, gilt es zwischen molekularer und viskoser Strömung zu unterscheiden. Bei viskosem Gasfluss ist die mittlere freie Weglänge der Partikel viel kleiner als der Querschnitt des durchströmten Raumes. Damit kommt es häufiger zu Teilchenkollisionen als zu Kollisionen mit den Wänden. Im Gegensatz zu viskosem ist bei molekularem Gasfluss die mittlere freie Weglänge deutlich größer als der Rohrquerschnitt. Die Teilchen stoßen häufiger mit der Wand als mit anderen Teilchen. Zur mathematischen Beschreibung dieses Verhaltens wurde von dem dänischen Naturwissenschaftler Martin Knudsen die so genannte Knudsen-Zahl definiert. Diese berechnet sich aus dem Quotienten von mittlerer freier Weglänge \bar{l} und Rohrquerschnitt d.

Die mittlere freie Weglänge lässt sich auch durch ihre Abhängigkeit von der Viskosität η , dem Druck p und der mittleren Geschwindigkeit \bar{c} ersetzen, um damit die folgende Formel zu erhalten:

$$Kn = \frac{\bar{l}}{d} = \frac{\pi \bar{c} \eta}{4pd} \quad (2.11)$$

Der Übergang zwischen molekularem und viskosem Fluss ist fließend, weshalb man folgende Unterteilung für die verschiedenen Strömungen definiert:

$$\begin{aligned} Kn > 0,5 & \text{ molekularer Fluss} \\ 0,5 > Kn > 0,01 & \text{ Übergangfluss} \\ Kn < 0,01 & \text{ viskoser Fluss} \end{aligned}$$

Für den Betrieb einer TMP benötigen wir, wie in Kapitel 1.1 erläutert, einen molekularen Fluss. Die Stärke der Reibung ist abhängig von der Zahl der auftreffenden Partikel, deren Energie bzw. Geschwindigkeit und der betrachteten Fläche. Die Anzahl der auftreffenden Teilchen lässt sich über die Kollisionsrate und die betrachtete Fläche wie folgt berechnen:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{p\bar{c}A}{4k_B T} \quad (2.12)$$

Bei molekularem Fluss sind Kollisionen der Partikel untereinander zu vernachlässigen.

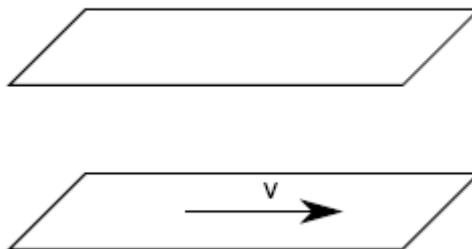


Abbildung 2.3: Stationäre und sich mit der Geschwindigkeit v bewegende Platte

Betrachtet man den Zwischenraum zwischen einer sich mit der Geschwindigkeit v bewegenden Platte und einer stationären Platte, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, so lassen sich daraus die grundsätzlichen Regeln der Gasreibung ableiten. Die Partikel besitzen zu Beginn eine isotrope Verteilung. Trifft das Partikel auf die sich bewegende Platte wird es dort kurz adsorbiert und erhält einen entsprechenden Geschwindigkeitsimpuls. Zur Beschreibung dieses Impulses wird der tangentialer Impulsaustauschkoeffizient σ_t definiert, der sich als Quotient aus mittlerer tangentialer Geschwindigkeit der reflektierten Partikel und Geschwindigkeit der Platte berechnet.

Berücksichtigt werden muss, dass das Partikel nach Kollision mit der bewegten Platte wieder mit der stationären Platte zusammentrifft.

Es ist daher eine Anpassung an σ_t notwendig, die sich wie folgt berechnet:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{t1}\sigma_{t2}}{\sigma_{t1} + \sigma_{t2} - 2\sigma_{t1}\sigma_{t2}} \quad (2.13)$$

σ_{t1} steht für den Anpassungskoeffizienten der ersten und σ_{t2} für den Anpassungskoeffizienten der zweiten Platte.

Eine Zusammenfassung all dieser Feststellungen führt zu folgender Formel:

$$F_R = \frac{1}{4} \frac{p\bar{c}}{k_B T} A \sigma_t m_p v \text{ bzw. } F_R = \frac{2}{\pi} p A \sigma_t \frac{v}{\bar{c}} \text{ wenn } \frac{m_p}{k_B \cdot T} = \sqrt{\frac{8 \cdot k_B \cdot T}{\pi \cdot m_p}} \text{ ersetzt wird} \quad (2.14)$$

Es zeigt sich, dass die Reibungskraft maßgeblich von der Fläche A, dem Druck p, der Rotorgeschwindigkeit v und der mittleren Teilchengeschwindigkeit \bar{c} abhängt. Um von der Reibungskraft auf die dadurch entstandene Leistung zu kommen wird $P=F \cdot v$ benutzt, woraus die für das Modell benötigte Formel resultiert. Da v vom Radius r abhängt, wird die gemittelte Rotorgeschwindigkeit $\langle v \rangle = \langle r \rangle \omega$ verwendet, die sich durch die Winkelgeschwindigkeit $\langle v \rangle = \langle r \rangle \omega$ ausdrücken lässt.

$$\frac{P}{m \cdot c} = \frac{2}{\pi} p A \sigma_t \frac{v^2}{\bar{c}} = k_3 Q \quad (2.15)$$

Der Beitrag der Gasreibung zur Erhitzung wurde im Model über $P/(m \cdot c) = k_3 \cdot Q$ berücksichtigt, wobei k_3 alle Konstanten beinhaltet und Q als Gasfluss stellvertretend für die Druckverhältnisse innerhalb der TMP steht. Der Parameter k_3 hängt dabei quadratisch von ω ab. Da die Teilchendichte entlang des Rotors zum Ausgang hin steigt, wird der Haupteffekt am hinteren Ende der Pumpe auftreten. Darum kann es für manche Anwendungen besser sein, anstatt Q den Vorvakuumdruck $P_{FV} = Q/S_{FV}$ zu nehmen. S_{FV} ist hier die effektive Pumpleistung der Vorvakuumpumpe.

2.2.2 Wärmeleitung und Konvektion

Da durch das Gas nicht nur ein Wärmeübertrag in Form von Reibung stattfindet, sondern durch die Adsorption auch Wärme aufgenommen bzw. abgegeben wird, spielt die Konvektion vor allem als kühlender Effekt eine wichtige Rolle. Die Herleitung der Formel für die Konvektion soll mit Hilfe von zwei gegenüberliegenden Platten mit unterschiedlicher Temperatur T_1 und T_2 erläutert werden. Bei der Wärmeleitung ist, wie auch bei der Reibung, der Energieaustausch proportional zur Anzahl der auftreffenden Teilchen, deren Geschwindigkeit und Temperatur. Dazu kommen die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Platten und die Freiheitsgrade der Teilchen zum Tragen. Die spezifische Wärmekapazität der Teilchen bei konstantem Volumen wird über $c_v = f \cdot k_B / 2m_p$ berechnet, wobei f für die Freiheitsgrade und m_p für die Masse eines Partikels steht.

Die Wärmekapazität für konstanten Druck ist über die folgende Formel definiert:

$$c_p = \frac{(f+2)k_B}{2m_p} = c_v + \frac{k_B}{m_p} \quad (2.16)$$

Aus dem Quotienten der beiden spezifischen Wärmekapazitäten lässt sich nun der Isentropenexponent κ bestimmen. Da der Energieübertrag durch die Platten nicht gleich ist, muss der Energieaustauschkoeffizient a_E als Quotient aus tatsächlichem und theoretischem Hitzefluss bei komplettem Wärmeaustausch eingeführt werden. Dies ist besonders im Hinblick auf die TMPs wichtig, da der TMP-Mantel aus Edelstahl und der Rotor aus Aluminium ist. Der Energieaustauschkoeffizient wird über Formel 2.9 berechnet:

$$a_E = \frac{a_{E1}a_{E2}}{a_{E1} + a_{E2} - a_{E1}a_{E2}} \quad (2.17)$$

wobei a_{E1} der Wärmeaustauschkoeffizient der einen und a_{E2} der Wärmeaustauschkoeffizient der anderen Platte ist.

Ein erster Ansatz für die transportierte Leistung lautet wie folgt:

$$P = j_N A a_E \frac{f}{2} k_B (T_2 - T_1) \quad (2.18)$$

wobei j_N die Kollisionsrate darstellt. Allerdings führt die Ableitung von Formel (2.18) zu einer falschen statistischen Geschwindigkeitsverteilung, da Teilchen mit größerer Energie auch schneller sind und damit auch die Energie schneller und besser übertragen. Daher muss der Freiheitsgrad um 1 erhöht werden. Ein

Ersetzen von j_N durch $\frac{p\bar{c}}{4k_B T}$ mit T als Temperatur des Mediums und f durch $\frac{2}{\kappa-1}$, das aus Umstellen der Isentropenexponentengleichung rührt, führt schließlich zu:

$$P = \frac{1}{8} p\bar{c} A a_E \frac{\kappa+1}{\kappa-1} \frac{T_2 - T_1}{T} = m \cdot c \cdot k_4 \cdot Q \cdot (T_r - T_s) \quad (2.19)$$

Daraus ist zu erkennen, dass die übertragene Leistung maßgeblich von der Temperaturdifferenz der beiden Medien und der Temperatur des übertragenden Mediums abhängt. Im Modell wird dieser Tatsache mit dem Term $k_4(T_r - T_s)Q$ Rechnung getragen. Die Konstante k_4 beinhaltet alle Konstanten die sich nicht genau messen lassen. Die Variable Q steht stellvertretend für den Vorvakuumdruck. Wie bereits im vorangehenden Kapitel dargestellt, wird der größte Effekt im Vorvakuumbereich stattfinden, weshalb die Parametrisierung über den Vorvakuumdruck besser sein kann.

2.3 Wärmetransport durch Wärmestrahlung

Die TMPs sind geschlossene Gefäße, daher kommt es sowohl zur Emission als auch zur Reflektion von Wärme in Form von elektromagnetischer Strahlung von den verschiedenen Komponenten. Die Intensität und Verteilung dieser Strahlung auf die verschiedenen Wellenlängen lässt sich über das Plancksche Strahlungsgesetz beschreiben:

$$\frac{dR}{d\lambda} = \frac{2\pi^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T \lambda}\right) - 1} \quad (2.20)$$

mit R als Strahlungsflußdichte, c als Lichtgeschwindigkeit, λ als Wellenlänge, h für das Plancksche Wirkungsquantum und k_B als Boltzmann-Konstante. Zur Veranschaulichung dieser Formel wird die spezifische Abstrahlung anhand verschiedener Temperaturen über den Wellenlängenbereich von 0 μm bis 60 μm in Abbildung 2.4 dargestellt.

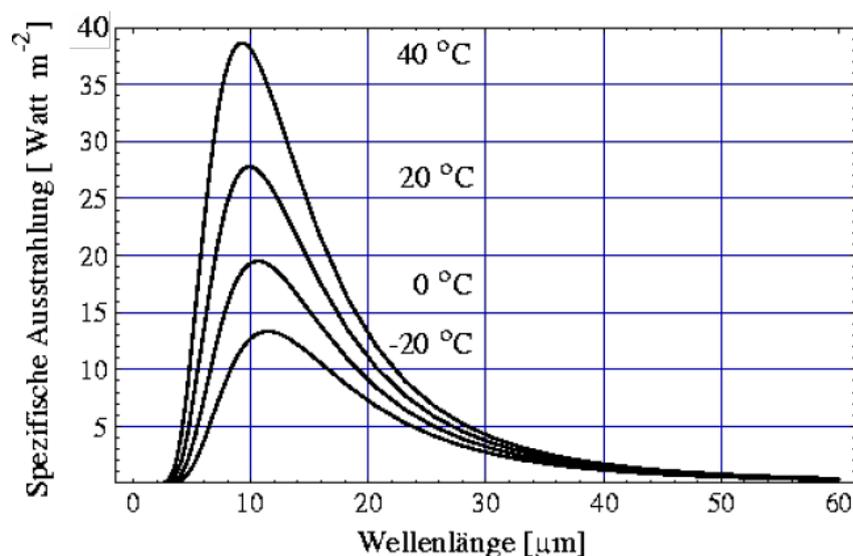


Abbildung 2.4: Plancksches Strahlungsspektrum [27]

Wie deutlich zu erkennen ist, befindet sich im Bereich zwischen 8 μm und 14 μm die stärkste Intensität. Daher ist das für die Rotortemperaturmessung verwendete Pyrometer (Kapitel 3.2.3) in diesem Wellenlängenbereich sensitiv.

Zur Beschreibung der Wärmestrahlung wird das Stefan-Boltzmann-Gesetz verwendet.

$$P = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (2.21)$$

Die abgestrahlte Wärmeleistung P ist abhängig von der vierten Potenz der Temperatur T des Körpers, der Fläche A, der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ und des Emissionsfaktors ε . Dieser Faktor ist materialspezifisch und liegt zwischen 0 und 1. Die Emission steht in direktem Zusammenhang zur Absorption.

Neben der Absorption gibt es noch die Reflexion und Transmission. Die Summe dieser drei Faktoren ergibt immer eins.

Am Beispiel des schwarzen Körpers zeigt sich, dass er weder Transmission noch Reflexion besitzt, sondern die komplette Strahlung absorbiert und wieder emittiert.

Da der Rotor in der Regel aus Aluminium besteht, besitzt er einen Emissionskoeffizienten von ca. 0,04 [5]. Der genaue Wert ist abhängig von der Oberfläche und muss mit umfassenden Messungen bestimmt werden. Da es sich bei der TMP um einen geschlossenen Körper handelt, ist neben der Emission auch noch die Reflektion der einzelnen Komponenten wichtig.

Die Bestimmung der abgestrahlten Wärmeleistung zwischen zwei Körpern ist damit als Differenz der Einzelleistungen in Abhängigkeit der Temperatur zu sehen. Die

Wärmestrahlung geht über $\frac{P}{mc} = k_5(T_s^4 - T_r^4)$ in das Modell ein und wirkt wie die

Konvektion in der Regel kühlend auf die Rotortemperatur.

2.4 Leerlaufleistung

Unabhängig von den äußeren Einflüssen wie Gasfluss und Magnetfeld kommt es bei Betrieb einer TMP durch interne Vorgänge zu einer Erhitzung des Rotors. Diese Erhitzung erfolgt zum einen über die thermische Strahlung des im Vergleich zum Rotor heißen Motors und zum anderen über die Wirbelströme, die durch die magnetische Lagerung entstehen. Diese beiden Faktoren sind in einer einzigen Konstante k_2 zusammengefasst. Es gibt die Möglichkeit diese Konstante über das Stefan-Boltzmann-Gesetz durch eine Abhängigkeit der Motortemperatur zu ergänzen, um den Einfluss auf den Rotor zu berücksichtigen. Da das Modell so einfach wie möglich gestaltet werden sollte, wurde auf diese Erweiterung verzichtet.

2.5 Fit-Algorithmus

Zur Berechnung der einzelnen Konstanten k_i der Leistungsbeiträge wurde der Euler-Algorithmus verwendet. Diese numerische Methode basiert auf einem iterativen Schrittverfahren. Ausgehend vom Startwert, wird der nächste Schritt über die Addition der Ableitung, welche zuvor mit der Schrittweite Δt multipliziert wird, berechnet. Dies wird durch Gleichung 2.22 illustriert:

$$T_r(t_{n+1}) = T_r(t_n) + \Delta t \frac{dT_r(t_n)}{dt} \quad (2.22)$$

Ausgehend von der Differentialgleichung folgt über die numerische Integration mit dem Euler-Algorithmus:

$$T_r(t_n) = T_r(t_0) + \Delta t \sum_{i=0}^{n-1} \frac{dT_r(t_i)}{dt} \quad (2.23)$$

Mit Hilfe des Analyseprogramms ROOT vom CERN³ wurden drei Programme erstellt (Quelltext siehe Anhang). Das erste Programm wandelt die Messdaten in Histogramme um. Im zweiten Programm werden die Parameter k_i über einen χ^2 -Fit über die gemessene Temperatur T_r und Gleichung (2.22) bestimmt.

2.6 Modell 1

Die Leistungsbilanz des Rotors und die einzelnen in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Beiträge wurden zum ersten Modell der Rotortemperaturerwärmung zusammen gefasst.

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{k_1 B^2}{1 + 3.9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293.15)} + k_2 + k_3 Q - k_4 (T_r - T_s) Q - k_5 (T_r^4 - T_s^4) \quad (2.24)$$

Dies führt zu einer Differentialgleichung für T_r die numerisch integriert werden kann. Der erste Term beschreibt den Leistungsbeitrag durch Wirbelströme in einem Magnetfeld B unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Rotors.

Im zweiten Term befindet sich die Leerlaufleistung. Sie setzt sich sowohl aus der Wärmestrahlung zwischen Rotor und Motor, als aus den Wirbelströmen, die durch die magnetische Lagerung entstehen, zusammen.

Der dritte Term beschreibt die durch die Gasreibung erzeugte Erwärmung, der vierte Term die durch Konvektion und Wärmeleitung bewirkte Kühlung. Alternativ kann auch der Vorvakuumdruck anstelle des Gasflusses Q verwendet werden.

Der letzte Term berücksichtigt den Wärmeübertrag des Rotors durch Wärmestrahlung auf den Stator.

Durch Messen des zeitlichen Verlaufs der Rotortemperatur T_r und der Gehäuse- bzw. Statortemperatur T_s für verschiedene Werte von Q und B können die Parameter k_1 - k_5 bestimmt werden. Für die Statortemperatur wird die außen gemessene Gehäusetemperatur verwendet, da die Statortemperatur sich im Innern nicht messen lässt.

Das Modell kann sowohl zur indirekten Überwachung der Rotortemperatur während des Betriebs, als auch zur Simulation von T_r beim Design eines neuen Vakuumsystems verwendet werden.

Für beide Modelle gilt, dass die Gehäusetemperatur nicht immer dauerhaft gemessen werden kann. Man unterscheidet daher zwischen dem "monitoring", bei dem eine dauerhafte Messung der Gehäusetemperatur gewährleistet ist und der Simulation bei dem eine feste Gehäusetemperatur angenommen werden muss. Entsprechend wurde die Berechnung der Konstanten in Kapitel 4 für beide Möglichkeiten durchgeführt.

³ Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire in Genf

2.7 Modell 2

Das zweite Modell nutzt anstelle des Magnetfelds und der Gasreibung den gemessenen Motorstrom. Dieser wird intern erfasst und ist ein Maß für die Arbeit, die der Motor leisten muss, um die abbremssende Wirkung der beiden Effekte zu kompensieren und den Rotor auf konstanter Frequenz zu halten.

$$\frac{dT_r}{dt} = k_1 I^2 + k_2 + k_3 I - k_4 (T_r - T_s) Q - k_5 (T_r^4 - T_s^4) \quad (2.25)$$

Die Bedeutung der einzelnen Terme k_4 und k_5 hat sich im Vergleich zum ersten Modell nicht verändert. Es wurden lediglich Gasreibung und Magnetfeld durch eine quadratische Funktion der Motorstromstärke ersetzt. Dieses Modell ist besonders für die indirekte Überwachung von T_r geeignet, wenn B nicht genau bekannt ist. Da das Modell von der gemessenen Stromstärke abhängt, eignet es sich nicht zur Simulation eines neuen Vakuumdesigns. Da der Motorstrom teilweise stark schwankt wurde für die Analyse der Messungen hauptsächlich das erste Modell verwendet. Zur Veranschaulichung dieser Schwankungen wurde Run 148 in Kapitel 4.2.3 mit Modell 2 gefittet.

2.8 Magnetische Abschirmung

Falls die benötigten Magnetfelder zu stark für in diesem Bereich verwendete Bauteile sind und damit den Betrieb dieser stören wird eine magnetische Abschirmung benötigt, die das Magnetfeld umleitet. Die Funktion einer Abschirmung basiert auf dem Prinzip der magnetischen Brechung. Beim Übergang von Luft in den ST37 Stahl kommt es durch die verschiedenen magnetischen Permeabilitäten zu einer Brechung. Die magnetischen Feldlinien werden infolge des Brechungsgesetzes tangential gebrochen und in der Abschirmung entlang geführt bis sie am hinteren Ende wieder austreten. Während dieses Durchgangs kommt es zu einer Ausrichtung der magnetischen Dipole und damit zu einer Magnetisierung der Abschirmung.

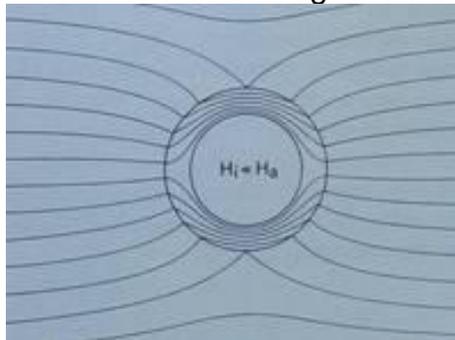


Abbildung 2.5: Verlauf der Magnetfeldlinien in einer Abschirmung [29]

Die Magnetisierung lässt sich allerdings nur bis zu einem gewissen Punkt steigern. An diesem Punkt ist das Material gesättigt und kann keine weiteren Magnetfeldlinien mehr aufnehmen. Dies lässt sich anhand einer Hysteresekurve, wie in Abbildung 2.6 gezeigt, demonstrieren.

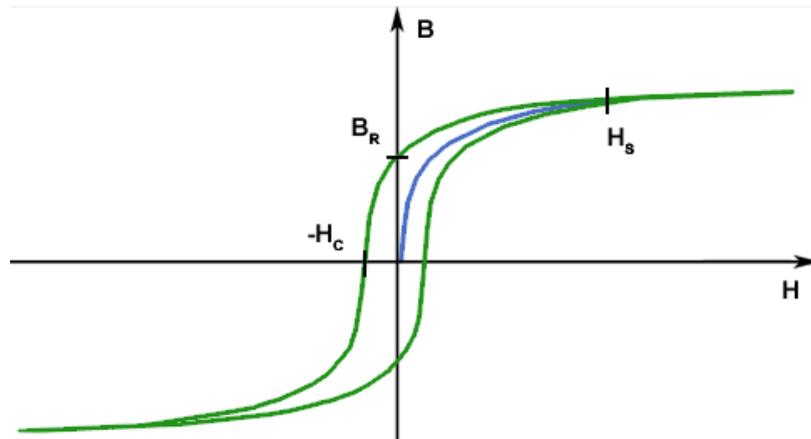


Abbildung 2.6: allgemeine Hysteresekurve [5]

Das zunehmende Abfallen der Steigung in positive x-Richtung führt zu einer immer kleiner werdenden Permeabilität bis diese schließlich bei eins liegt. Eine weitere Erhöhung des Feldes bewirkt keinen messbaren Effekt mehr, da alle Dipole ausgerichtet sind. Wird die Abschirmung in ihrer Dicke erweitert, sind mehr magnetische Dipole vorhanden die ausgerichtet werden können. Entsprechend ermöglicht dies auch die Absorption von weiteren Magnetfeldlinien und damit eines stärkeren Magnetfeldes.

Die theoretische Vorhersage des Magnetfeldes innerhalb einer Abschirmung oder im Innern der Abschirmung lässt sich näherungsweise wie folgt berechnen [31]:

$$S = \frac{4}{3} \mu_r \frac{d}{r} \quad (2.26)$$

wobei r für den Radius und d für die Dicke der Abschirmung stehen. Mithilfe der geometrischen Werte und der Permeabilitätskonstanten μ_r lässt sich dann der Reduktionsfaktor S berechnen. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden Magnetfeldstärken gewählt, die sowohl mit alten Messungen vergleichbar sind als auch die Grenze der Abschirmung aufweisen. Die daraus erhaltenen Daten spiegeln sich in den folgenden Abbildungen wieder.

3 Versuchsaufbau

Wie in Kapitel 2 beschrieben müssen mehrere Variablen für das Modell erfasst werden. Die ersten Messungen wurden mit Spulen durchgeführt, die einen Durchmesser von 60 cm hatten. Aufgrund der Größe der TMPs konnten sie kein homogenes Feld erzeugen. Die Spulen wurden daher durch ein wesentlich größeres Helmholtz-Spulen-Paar ersetzt, die auf die Größe der TMPs ausgelegt waren. Der Versuchsaufbau in Abbildung 3.1 besteht aus Vakuumsystem, Magnetsystem, Temperatursensoren, Kühlung und Datenerfassung. Die einzelnen Komponenten und deren Funktionsweise werden im Folgenden erläutert.



Abbildung 3.1: Überblick über den gesamten Versuchsaufbau. Links die Helmholtz-Spule mit TMP und rechts die für die Datenaufnahme verwendeten PCs.

3.1 Vakuumsystem

Das Vakuumsystem besteht aus einem Pumpstand zur Erzeugung des Vorvakuums den beiden Vorpumpen, der zu untersuchenden TMP, Vakuumröhren und einem Gasflussmesser mit aktiver Flussregelung.

3.1.1 Vorvakuumsystem

Da für den Betrieb einer TMP eine Vorvakuum im Bereich von 10^{-2} mbar benötigt wird, wurde eine Wälzkolbenpumpe der Firma „Alcatel“ des Typs ACP 15 mit einer Leistung von 14 m³/h und eine kleinere TMP der Firma Leybold des Typs „Turbovac 151 C“ mit 150 l/s für N₂ verwendet. Die kleine TMP war nur für die ersten Messungen in Gebrauch, um einen möglichst niedrigen Vorvakuumdruck zu erzeugen. Bei späteren Messungen wurde auf die kleine TMP verzichtet, da es bei Messungen mit Helium zu Problemen kam, da die kleine TMP selbst bei geringem Heliumfluss im Bereich von 20 sccm⁴ überfordert war. Das Vorvakuumsystem wurde mit einem 1m langen DN40mm Wellschlauch mit der zu testenden TMP verbunden. Dadurch verringert sich die effektive Pumpleistung des Vorvakuumsystems auf 69,17 l/s mit der Turbovac 151 C und auf 3,77 l/s wenn nur die ACP15 Pumpe verwendet wird.

3.1.2 Die untersuchten Turbomolekularpumpen

Die Messungen wurden mit zwei verschiedenen Pumpen der Firma Leybold durchgeführt. Es wurde jeweils eine TMP vom Typ MAG W 2800 und eine vom Typ MAG W 2200 verwendet. Beide TMPs besitzen einen magnetisch gelagerten Aluminiumrotor, einen CF250 Hochvakuumflansch und einen KF40 Vorvakuumanschluss.



Abbildung 3.2: Links MAG W 2800 und rechts MAG W 2200 mit geschwärztem Rotor

⁴ sccm steht für „standard cubic centimeter per minute“. 1 sccm entspricht 0,0169 mbar/l·s bei einer Gastemperatur von 20 °C

Die beiden TMPs unterscheiden sich in ihren geometrischen Abmessungen und ihrer Pumpleistung. Die Pumpleistung der MAG 2200 beträgt dabei 2000 l/s für N₂, während die Leistung der MAG 2800 bei 2650 l/s liegt. Die wichtigsten Daten der beiden Pumpen sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Eine ausführlichere Liste ist in Anhang A1 zu finden.

Tabelle 3.1: Randdaten der beiden verwendeten TMPs

Eigenschaft	MAG W 2200	MAG W 2800
Rotordurchmesser	315 mm	369 mm
Rotormaterial	Aluminium	Aluminium
Rotorfrequenz	490 Hz	480 Hz
Pumpleistung für N ₂	555,56 m ³ /h	736,11 m ³ /h

Die Kommunikation mit dem Controller der TMPs zur Steuerung und zur Datenaufnahme verschiedener Betriebsparameter erfolgt über das Programm „Datalogger“ der Fa. Leybold. Abbildung 3.3 zeigt die Lage der verschiedenen Sensoren, die zusätzlich zum Motorstrom und der Rotorfrequenz aufgezeichnet wurden.

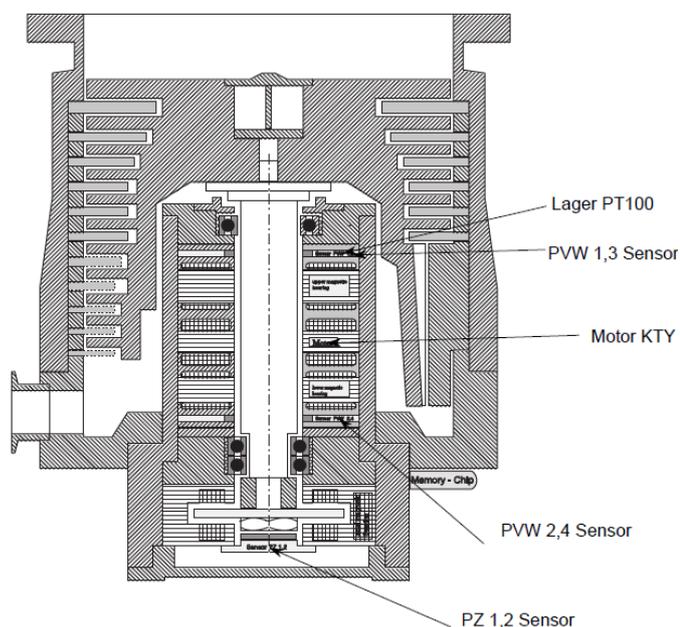


Abbildung 3.3: Querschnitt einer TMP und Anordnung der internen Temperatursensoren (PT100, KTY) und Positionssensoren des Magnetlagers

Die Temperatur wurde mit Hilfe von drei PT100-Sensoren und einem KTY-Sensor erfasst. KTY-Sensoren funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie PT100-Sensoren (siehe Kapitel 3.2.1). Sie unterscheiden sich darin, dass sie nicht aus Metall sondern aus einem Halbleitermaterial wie Silizium hergestellt werden. Zur Bestimmung der Rotorposition werden die Daten von drei verschiedenen Sensoren erfasst, die, wie in Abbildung 3.3 gezeigt, die Ausrichtung der Achse (PVW 1,3 und PVW 2,4) und die Lage des Rotors in Achsenrichtung (PZ 1,2) aufnehmen.

3.1.3 Druckmessung

Der Druck der Hochvakuumseite der TMP wurde mit einer „wide range“ Kombinationsmessröhre vom Typ „Atmion“ der Firma Vacom überwacht. Diese deckt mit Hilfe einer Pirani- und einer Bayert-Alpert-Röhre einen Messbereich von 10^{-10} mbar bis 1000 mbar ab. Die Abweichungen in diesem Bereich betragen 10% des Messwertes im Bereich von 10^{-8} mbar bis 10^{-2} mbar und 25% im Bereich von 10^{-2} mbar bis 10 mbar.

Der Vorvakuumdruck wurde mit einer Pirani-Röhre des Typs „TPR-010“ der Firma Balzers aufgenommen. Diese besitzt einen Messbereich von $8 \cdot 10^{-4}$ mbar bis 1000 mbar. Der Bereich über 100 mbar und unter 10^{-3} mbar besitzt nur eine eingeschränkte Meßgenauigkeit. Die Sensoren sind in Abbildung 3.4 zu sehen.

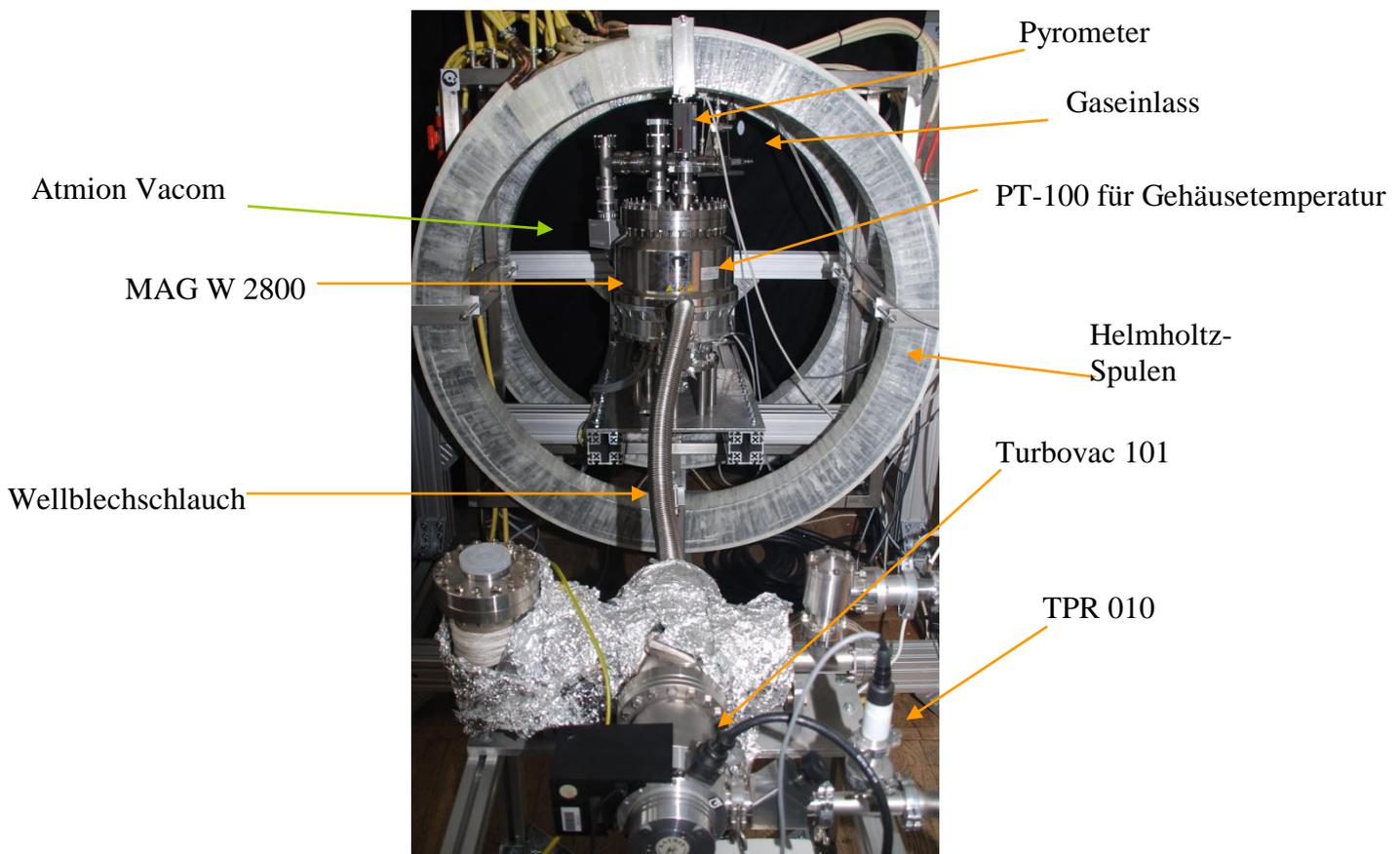


Abbildung 3.4: Anordnung der einzelnen Komponenten

3.1.4 Gasflussmessung

Die Gasflussmessung wurde mit Hilfe eines MKS Mass Flow Controllers vom Typ „179A“ und eines MKS PR4000 Steuergerätes ermöglicht. Das Steuergerät gewährleistet die genaue Einstellung eines über Tage konstanten Gasflusses. Die Skala deckt einen Bereich von 0 sccm bis 200 sccm ab. Die maximale Abweichung des Flusses beträgt $\pm 1,0\%$ des Messwertes. Die Flussmessung hängt von der Gasart ab. Der Gaskorrekturfaktor wurde beim Einstellen des Flusswerts berücksichtigt.

3.2 Temperaturmessung

Die Herausforderung der Temperaturmessung ist die berührungslose Bestimmung der Temperatur, während der Rotor sich frei schwebend im Vakuum befindet und mit sehr hoher Geschwindigkeit dreht. Zur Lösung dieses Problems wurde ein Infrarot-Pyrometer verwendet. Die der Temperaturen der fest stehenden Komponenten wurden mit PT100-Sensoren erfasst.

3.2.1 PT-100-Sensor

Zur Temperaturerfassung der Gehäuse- und Flanschtemperatur der TMP wurden PT100-Sensoren verwendet. Diese Sensoren bestehen aus auf Kunststoffolie aufgedruckten dünnen Platindrähten. Der Widerstand beträgt 100Ω bei 0°C .

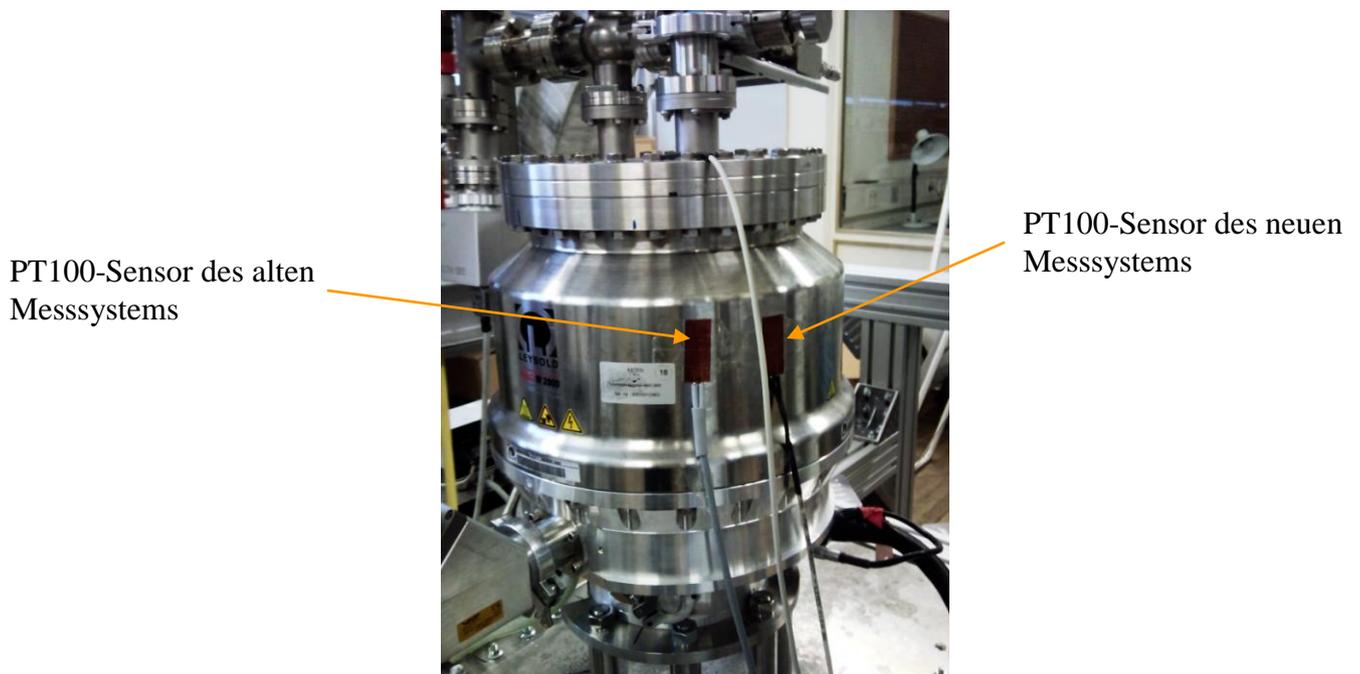


Abbildung 3.5: MAG W 2800 mit zwei angebrachten PT100-Sensoren zur Erfassung der Gehäusetemperatur. In diesem Fall zwei Sensoren, da einer mit dem alten und der andere mit dem neuen Messsystem verbunden ist.

Die Berechnung der Temperatur T über den gemessenen Widerstand R erfolgt über folgende Formel (aus [33]):

$$R = 100 + 0,39 \cdot T - 5,80 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \quad (3.1)$$

Um diese Veränderungen erfassen zu können, wird ein konstanter, durch eine Präzisionsstromquelle erzeugter, Strom durch den PT100-Sensor geleitet und der Spannungsabfall gemessen. Über den aktuellen Widerstand des Sensors wird die Temperatur über die Widerstandskennlinie (Anhang A2) bestimmt. Für alle Messungen wurde ein Strom von 2,5 mA eingesetzt, der mit einer Präzisionskonstantstromquelle des Typs „DIGISTANT Typ 4421,“ erzeugt wurde. In Abhängigkeit ihrer Klasse ergeben sich für die PT100-Sensoren verschiedene Unsicherheiten in der Temperaturerfassung. Die hier verwendeten Sensoren sind von der Klasse B und haben damit eine systematische Messunsicherheit von $\Delta T = \pm 0,3^\circ\text{C} + 0,005 \cdot T$ [29].

3.2.2 Kühlung des TMP-Motors

Die TMP kann über einen Wasseranschluß gekühlt werden. Die Kühlung der TMPs wurde mit einem Labortemperiergerät des Typs „F3“ der Firma „Haake“ realisiert. Dieses Gerät setzt sich aus einer Heiz- und einer Kühleinheit zusammen. Die Temperatur des Wassers wird dabei mit einem PT100-Sensor innerhalb des Geräts überwacht. Der Anschluss erfolgt über zwei PVC-Schläuche an den Kühlwasser-Ein- bzw. Ausgang der TMP. Damit war es auch möglich die Auswirkungen von wärmerem oder kühlerem Wasser auf die Motor- bzw. Rotortemperatur zu testen. Die Ergebnisse dafür befinden sich in Kapitel 4.3.

3.2.3 Pyrometer

Zur Messung der Rotortemperatur kommt wegen der hohen Geschwindigkeit des Rotors und des Vakuums, nur eine kontaktlose Temperaturmessung in Frage. Es wurde ein Heitronics KT15.82 IIP Pyrometer verwendet, das einen Temperaturbereich von -30°C bis 1000°C abdeckt und ein analoges Ausgangssignal von 0 mV bis 10000 mV ausgibt, das proportional zur Temperatur ist. Die Genauigkeit des Pyrometers liegt bei $\Delta T = \pm 0,5^\circ\text{C} + 0,7\%$ der Temperaturdifferenz zwischen Gehäuse und Messpunkt [34]. Das verwendete Pyrometer mit einem Vakuumanschluß ist in Abbildung 3.6 zu sehen.



Abbildung 3.6: Das verwendete KT15.82 IIP-Pyrometer, links der KF-Flansch und rechts auf dem Deckel die Steckerverbindung zum Auslesen der Spannung

Die Wärmestrahlung wird intern im Pyrometer erfasst, verarbeitet und dann über ein 12 Bit-DAC weitergeleitet. Die Umrechnung der theoretischen Angabe ergibt sich durch Bildung des Quotienten aus dem Maximum des eingestellten Spannungsbereich von 0 mV - 10000 mV und der maximalen Temperatur des eingestellten Bereichs (0 °C-200 °C). Daraus folgt, dass 50 mV 1 °C entsprechen. Damit lässt sich die Pyrometerspannung über die Multiplikation mit 0,02 in den entsprechenden Temperaturwert umrechnen. Um diesen theoretischen Wert zu erreichen muss der Emissionsfaktor exakt bekannt sein. Die verwendeten TMPs besitzen einen Aluminiumrotor. Da der Emissionsfaktor abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit ist kann sich die Bestimmung sehr umfangreich und zeitaufwändig gestalten. Die ersten Kalibrationsmessungen bestätigten dieses Problem, da keine brauchbare Kalibrationskurve erreicht wurde.

Um einen bekannten Emissionsfaktor zu erhalten, wurde der Rotor mit Hilfe eines Edding[®]-Stiftes geschwärzt und auf einen Faktor von 0,95 eingestellt [35]. Es handelt sich um einen Richtwert mit Abweichungen, da die Farbabdeckung nicht überall perfekt war. Weitere Kalibrierungen waren erforderlich.

Zur genauen Bestimmung des Umrechnungsfaktors wurden mehrere verschiedene Verfahren angewendet, um die Erhitzung der Pumpe zu simulieren und die Temperatur auf der Rotoroberfläche mit einem PT-100 Sensor auszulesen.

3.2.3.1 Kalibration des Pyrometers

Um die Rotortemperatur zu Kalibrationszwecken erfassen zu können, wurde ein PT100-Sensor verwendet, der an einer kleinen Metallstange befestigt wurde (Abbildung 3.7). Die Länge der Metallstange entsprach dabei genau der Höhe zwischen der Flanschöffnung am oberen Deckel und der Rotoroberfläche. Damit der Kontakt zur Rotoroberfläche sichergestellt war, wurde noch eine kleine Metallschleife direkt über dem PT100 angebracht, die den PT100-Sensor auf die Oberfläche drückt, sobald er komplett in die Pumpe eingeführt war. Zusätzlich wurde die Metallstange an einem KF-Flansch mit einer Signaldurchführung montiert um auch Messungen im Vakuum zu ermöglichen.

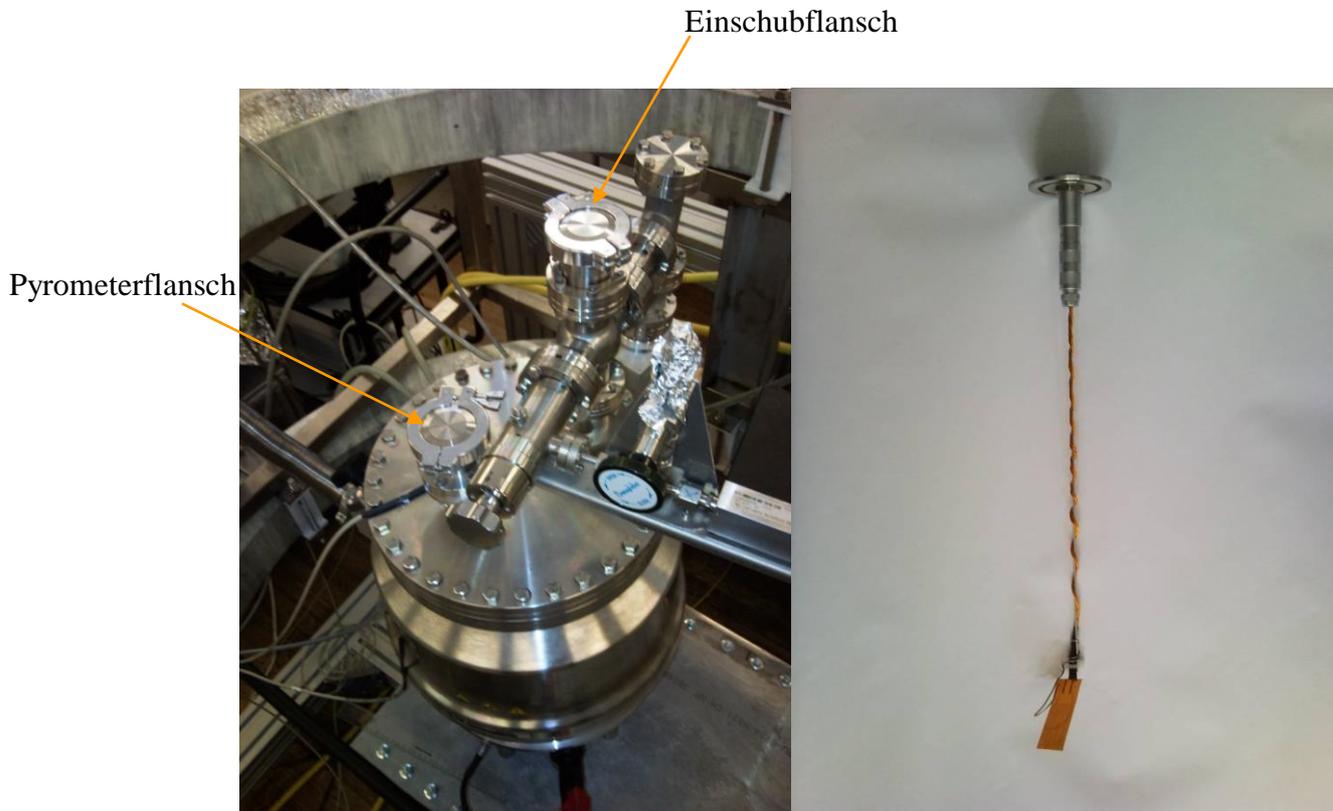


Abbildung 3.7: PT100-Sensor, welcher für die Messung der Oberflächentemperatur im Rahmen der Kalibrierungsmessungen verwendet wurde. Er wurde mit einem Edelstahl Draht stabilisiert. Das zu einer Schleife gebogene und abgewinkelte Ende des Drahtes fixiert den flexiblen Foliensensor auf der Oberfläche des Rotors. Eingeführt wird er von oben in den markierten Flansch.

Durch das in das Pyrometer integrierte Wechsellichtverfahren ist es wichtig, dass das Pyrometer die gleiche Temperatur besitzt wie das Gehäuse. Das Wechsellichtverfahren unterdrückt den thermischen Drift und die äußere Fremdeinstrahlung durch ein periodisches Unterbrechen der einfallenden Strahlung mit Hilfe einer mechanisch gesteuerten Blende. Während dieser Unterbrechung wird Strahlung aus einer Referenzquelle, einem integrierten schwarzen Körper, eingeführt und damit die Außeneinstrahlung aus dem gemessenen Signal heraus gefiltert. Es ist unerlässlich, dass das Pyrometer direkten Kontakt zur Pumpe hat, um damit die Gehäusetemperatur anzunehmen. Ist dies nicht der Fall, wird ein zu kleiner Teil der Strahlung heraus gefiltert und damit die Messung verfälscht.

3.2.3.2 Frühere Kalibrationsmessungen

Ausgehend davon, dass der Emissionsfaktor des Aluminiumrotors bekannt ist ($\epsilon=0,04$), wurden die ersten Messungen ohne Schwärzung des Rotors durchgeführt. Es wurde vor allem darauf geachtet den Rotor unabhängig vom Pumpgehäuse zu erhitzen. Dies stellte sich im Nachhinein als wichtig heraus, da das Pyrometer einer starken und schnellen Erhitzung des Pumpgehäuses nicht folgen kann. Sollte dies der Fall sein werden reflektierte Seiteneinstrahlungen zum eigentlichen Signal nicht korrekt mit eingerechnet. Eine der ersten Kalibrierungen erfolgte über das Erhitzen mit Hilfe eines elektrischen Heizbandes. Dieses wurde um den unteren Teil der Pumpe gewickelt und erhitzt, während der obere Teil mit Hilfe von wasserdurchflossenen Kupferrohren gekühlt wurde.

Es sollte eine Erhitzung des Rotors und gleichzeitig eine Kühlung des Pumpgehäuses erreicht werden, um die bei normalen Messungen herrschenden Betriebsbedingungen zu simulieren. Die Wasserkühlung stellte sich als ineffizient heraus, da der lose Kontakt zwischen den Kupferrohren und dem Pumpgehäuse nicht ausreicht um die entstehende Wärmemenge abzuführen.

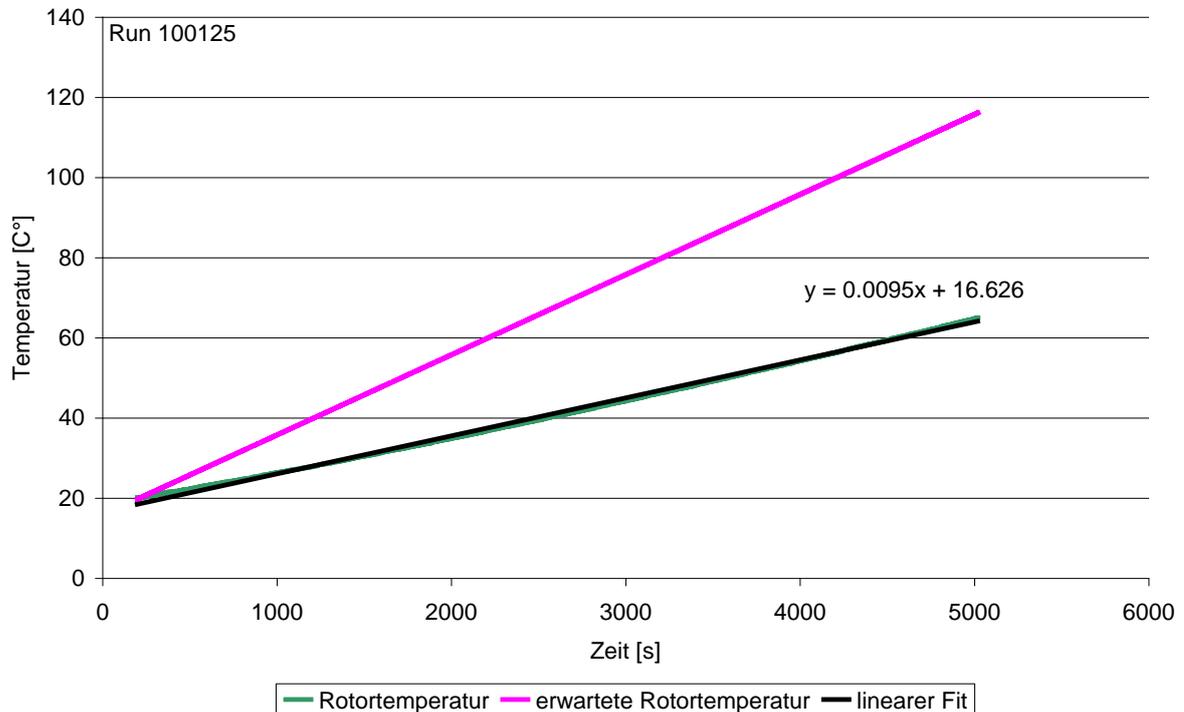


Abbildung 3.8: Kalibrationskurve einer Messung mit Heizspindel (MAG W 2800)

Abbildung 3.8 zeigt deutlich, dass die Pyrometerwerte von den erwarteten Werten abweichen. Dies ist zum einen auf die gleichzeitige Erwärmung von Rotor und Gehäuse als auch auf den nicht genau bekannten Emissionskoeffizienten zurückzuführen. Um den Einfluss von reflektierter Wärmestrahlung des Gehäuses zu minimieren wurde die vom Pyrometer sichtbare Fläche des Rotors für die weiteren Messungen geschwärzt.

Eine Verbesserung dieser Methode wurde mit heißem Stickstoffgas angestrebt. Dabei wurde das Gas durch ein Heizband, das um den Gasschlauch gewunden wurde, erhitzt und über den Vorvakuumstutzen in die TMP geleitet. Gleichzeitig wurde versucht, die Statortemperatur mit Hilfe der Kupferschläuche möglichst gering zu halten. Da nun ein Gasauslass benötigt wurde, musste der Flansch abgenommen und das Pyrometer mit Hilfe von Bosch-Profilen über der TMP befestigt werden. Auch diese Vorgehensweise führte zu einer Geradensteigung, die sehr stark von der zu erwartenden Temperatur abwich. Die Erklärung liegt in der Aufhängung des Pyrometers unabhängig von der Pumpe. Dadurch nahm die Referenzquelle im Pyrometer eine völlig falsche Temperatur an und verfälschte durch das Wechsellichtverfahren das Signal.

3.2.3.3 Verwendete Methode

Um möglichst realistische Versuchsbedingungen für die Kalibrationsmessungen zu erreichen wurde die TMP auf die maximale Rotorfrequenz von 480 Hz bzw. 490 Hz hochgefahren und ein starkes Magnetfeld im Bereich von 8 mT angelegt. Die Stärke des Magnetfeldes wurde gewählt um eine möglichst schnelle Erhitzung des Rotors zu gewährleisten. Dadurch wird die Erwärmung des Stators und des Pumpgehäuses durch Wärmestrahlung minimiert. Sobald eine vorher festgelegte theoretische Grenzspannung, im Bereich zwischen 4500 mV und 5000 mV, erreicht war, wurde das Magnetfeld abgeschaltet und die TMP heruntergefahren. Nach Stillstand des Rotors wurde die TMP belüftet und der modifizierte PT100-Temperatursensor auf der Rotoroberfläche aufgebracht um die Abkühlkurve der Rotortemperatur aufnehmen zu können.

Für die MAG W 2200 ergab sich dabei folgender Wert:

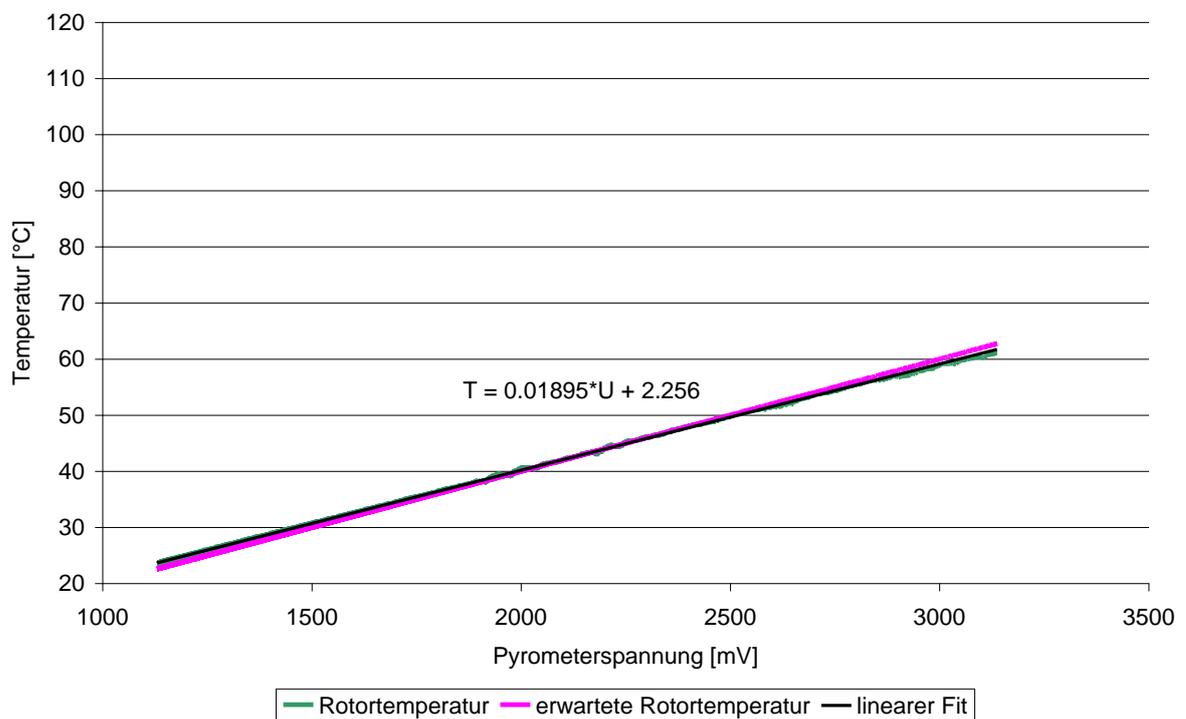


Abbildung 3.9: Kalibrationskurve der MAG W 2200 mit geschwärztem Rotor und einem Emissionsfaktor von $\epsilon = 0,95$

Es ist deutlich zu erkennen, dass hier, im Gegensatz zu den alten Messungen, die erwartete Gerade gut mit der gemessenen übereinstimmt.

Dies ist auf den nahezu korrekten Emissionskoeffizienten und auf die vergleichsweise geringe Erwärmung des Pumpgehäuses zurückzuführen.

Für die MAG W 2200 wurden zwei Kalibrationsmessungen durchgeführt, die beide eine ähnliche Geradengleichung hervorbrachten.

Tabelle 3.2: Geradengleichungen der verschiedenen Kalibrationen (MAG W 2200)

Steigung [°C/mV]	Fehler Steigung [°C/mV]	y-Abschnitt [°C]	Fehler y-Abschnitt [°C]
$1,93 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	1,72	$2,3 \cdot 10^{-2}$
$1,90 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	2,26	$5,2 \cdot 10^{-3}$

Der Vergleich der Diagramme und der Fehlergrößen zeigt, dass die zweite Messung wesentlich genauer als die Erste ist.

Daher wird für alle Messungen mit der MAG W 2200 folgender Kalibrationsfaktor für die MAG W 2200 verwendet:

$$T = (0,01895 \pm 3,087 \cdot 10^{-5}) \cdot U_{Pyro} + (2,256 \pm 5,156 \cdot 10^{-3}) \quad (3.2)$$

Bei Messungen mit der MAG W 2800 kam es aufgrund des größeren Abstands zwischen Flansch und Rotoroberfläche zu keinem oder nur teilweise vorhandenem Kontakt zwischen PT100-Sensor und Rotoroberfläche.

Bei den fünf durchgeführten Kalibrationsmessungen waren starke Abweichungen zwischen den einzelnen Steigungen vorhanden, wie Tabelle 3.3 deutlich macht.

Tabelle 3.3: Geradengleichungen der verschiedenen Kalibrationen (MAG W 2800)

Run-Nr.:	Steigung [°C/mV]	Fehler Steigung [°C/mV]	y-Abschnitt [°C/mV]	Fehler y-Abschnitt [°C]
181	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	2,86	$8,6 \cdot 10^{-3}$
181-2	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$0,1 \cdot 10^{-6}$	-2,81	$2,5 \cdot 10^{-4}$
183	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	6,60	$8,9 \cdot 10^{-3}$
183-2	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	6,81	$7,4 \cdot 10^{-3}$
100811	$2,30 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	-3,32	$6,8 \cdot 10^{-3}$

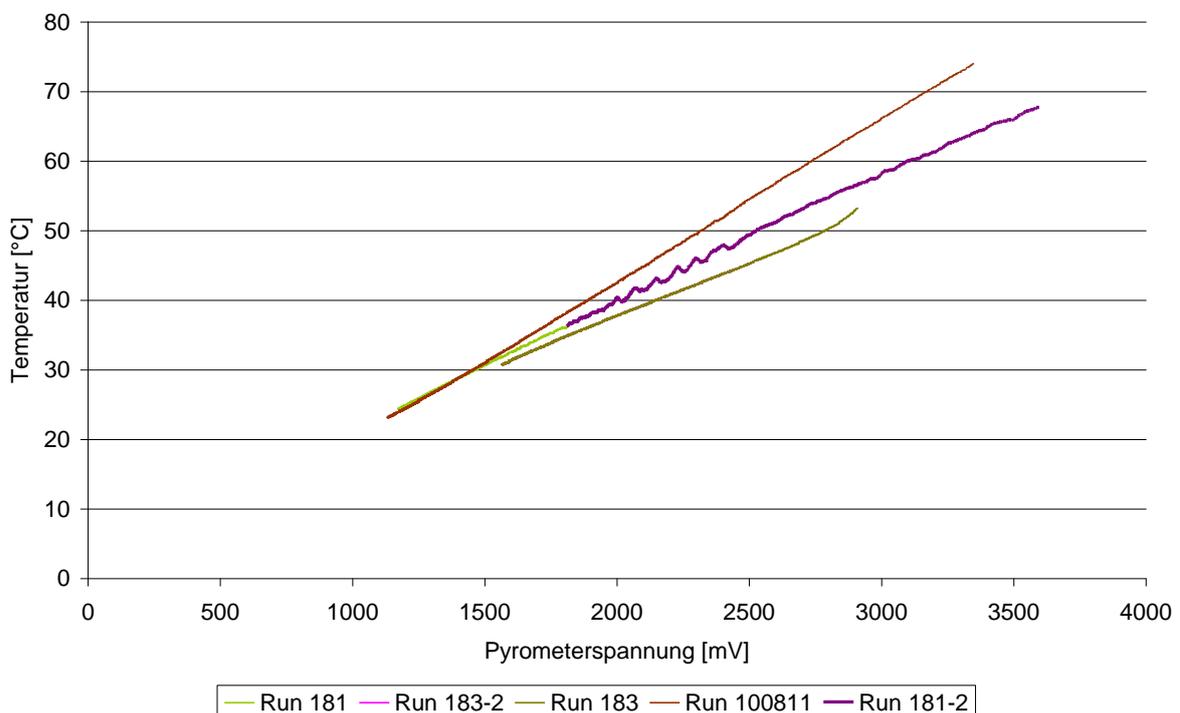


Abbildung 3.10: Überblick über die Kalibrationsruns der MAG W 2800

Der Vergleich der einzelnen Ergebnisse zeigt die deutliche Streuung der einzelnen Geradensteigungen. Um einen vertretbaren Kalibrationsfaktor für die durchgeführten Messungen zu erhalten, wurden die Messungen auf Gemeinsamkeiten in den erhaltenen Werten überprüft. Dies ergab, dass bei Erreichen der Gleichgewichtstemperatur von Rotor und umgebender Luft, der Quotient aus Rotortemperatur und Pyrometersignal immer gegen den gleichen Wert von ca. 0,02 strebt. Zur Ermittlung des Umrechnungsfaktors wurde daher der Endbereich der Messungen, während sich das System im Gleichgewicht befand, verwendet. Aus den daraus erhaltenen Geradensteigungen wurde der Mittelwert berechnet.

Tabelle 3.4: Geradengleichungen der Kalibrationsmessungen im Gleichgewicht (MAG W 2800)

Steigung[°C/mV]	Fehler Steigung [°C/mV]	y-Abschnitt [°C]	Fehler y-Abschnitt [°C]
$1,95 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	1,45	$4,9 \cdot 10^{-2}$
$2,17 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	-2,18	$4,3 \cdot 10^{-2}$
$1,75 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	3,38	$7,4 \cdot 10^{-2}$
$1,71 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	4,01	$5,4 \cdot 10^{-2}$
$1,98 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	0,72	$3,9 \cdot 10^{-2}$

Daraus resultiert ein Umrechnungsfaktor für die MAG W 2800 von

$$T = (0,01913 \pm 3,479 \cdot 10^{-5}) \cdot U_{Pyro} + (1,345 \pm 0,05182) \quad (3.3)$$

Es war somit möglich einen Kalibrationsfaktor zu erhalten, aber das grundsätzliche Problem der Kalibration bleibt. Die Position des eingebrachten PT100-Sensors auf die Oberfläche kann nicht kontrolliert werden. Der Flansch durch den der Sensor eingebracht wird, liegt nicht über dem Rotorblock, sondern über den Rotorblättern, wie in Abbildung 3.11 gezeigt. Dadurch kann es zu ungenügendem Kontakt zwischen Sensor und Rotor kommen.

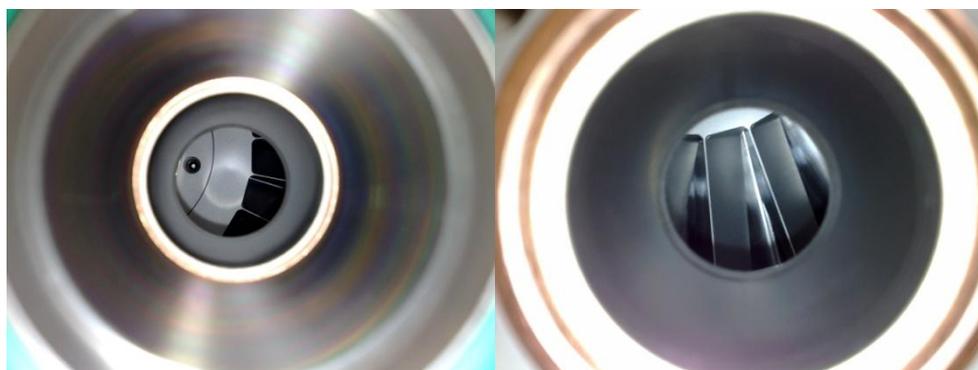


Abbildung 3.11: Links: Sichtfeld des Pyrometers und rechts Blick durch den Einbringflansch des Sensors (MAG W 2800)

3.2.3.4 Verbesserungsmöglichkeiten

Um eine bessere Positionierbarkeit bei den Versuchen zu erreichen, kann ein neuer Sensor auf Nickel-Chrom-Basis eingesetzt werden. Dieser misst im Gegensatz zu PT100 Sensoren die Temperatur an der Spitze und hängt nicht von der Auflagefläche ab, wie der PT100-Foliensensor.



Abbildung 3.12: Chrom-Nickel-Sensor

Die Messung erfolgt dabei nicht wie bei den PT100 Sensoren über den Widerstand, sondern über die Thermospannung. Damit ist es möglich die Temperatur direkt auf der Oberfläche des Rotors zu messen. Kurz vor Fertigstellung dieses Sensors stellte sich ein Defekt im Pyrometer ein.

Da der Fehler nicht zu finden war, blieb nur die Einsendung an den Hersteller. Aufgrund der langen Zeitspanne der Reparatur waren die Messungen im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchführbar.

Eine weitere Verbesserung ließe sich erreichen, indem eine weitere Öffnung in den Flansch auf Höhe des Rotorblocks integriert werden würde. Dadurch sollte es zum einen möglich sein die genaue Positionierung des PT-100-Sensors zu beobachten und zum anderen den Sensor fester auf den Rotorblock zu drücken.

Eine andere Vorgehensweise wäre, den Emissionsfaktor im Pyrometer soweit anzupassen, bis Sensor- und Pyrometer Temperatur übereinstimmen. Dazu müsste bei bekannter Rotortemperatur der Emissionsfaktor des Pyrometers solange angepasst werden, bis Umrechnung und gemessene Temperatur exakt übereinstimmen. Es wäre damit möglich für jede Pumpe einen eigenen Emissionsfaktor einzustellen und die Kalibration zu erleichtern.

3.3 Magnetsystem

Zur Analyse des Verhaltens von TMPs in Magnetfeldern wird ein möglichst homogenes und drehbares Magnetfeld benötigt. Zu diesem Zweck wurden ein Helmholtz-Spulenpaar, welches ein Magnetfeld bis zu 50 mT erreicht, und ein entsprechendes Netzteil, das einen Strom von bis zu 250 A liefern kann, verwendet. Da solche Ströme auch eine starke Abwärme erzeugen, wurden zusätzlich Kupferrohre an der Außenseite der Spulen angebracht um eine Abfuhr der Wärme über Wasserkühlung zu ermöglichen. Die beiden nachfolgenden Unterkapitel sollen daher einen Überblick über die verwendeten Geräte vermitteln.

3.3.1 Netzteil

Zur Erzeugung des Stromes wurde ein Sulzer TopCon TC-LV benutzt. Dieses Netzteil versorgt das Helmholtz-Spulen-Paar mit einem Strom bis zu 250 A und einer Spannung von 100 V, was mit den vorhandenen Spulen Magnetfelder bis 50 mT ermöglicht. Da der ausgegebene Strom vom angezeigten leicht abweicht, wurde eine Kalibrationsmessung mit Hilfe eines Multimeters durchgeführt und daraus ein Korrekturfaktor bestimmt, der die Umrechnung des Netzteil-Stromes in den wirklichen Strom ermöglicht. Dieser Korrekturfaktor beträgt $I_{\text{Wirklich}} = 0,9294 \cdot I_{\text{Netzteil}} \pm 0,03646$. Die ersten Rotortemperaturmessungen wurden mit einer Stromzange zur Stromerfassung durchgeführt. Aufgrund der Batterieabhängigkeit der Stromzange wurden teils stark schwankende und zudem abfallende Stromwerte angezeigt. Daher wurde die Erfassung des Stromes auf den angezeigten Strom des Netzteils umgestellt.

3.3.2 Helmholtz-Spulen

Die Erzeugung eines möglichst homogenen und starken Magnetfeldes wurde durch die Verwendung eines drehbar gelagerten Helmholtz-Spulen-Paares ermöglicht. Diese eignen sich besonders, da die Überlagerung der einzelnen inhomogenen Felder ein homogenes Feld in der Spulenachse erzeugt. Die Helmholtzkonfiguration zeichnet sich dadurch aus, dass der Spulenabstand gleich dem Spulenradius ist. Die zur Messung verwendeten Helmholtz-Spulen besitzen folgende Spezifikationen:

Tabelle 3.5: Eigenschaften der Helmholtz-Spulen

Eigenschaft	Spezifischer Wert
max. Feldstärke	50 mT
Ampere-Windungen	33360 A Wdg.
max. Strom	250 A
max. Spannung pro Spule	40 V
max. Wärmelast	10 kW pro Spule
Radius (Spulenmitte)	600 mm
Leitermaterial	Aluminium eloxiert
Leiterquerschnitt	105 mm x 0.8 mm
Windungszahl	133
Spulenquerschnitt	ca. 105 mm x 110 mm (b x h)
Gewicht	ca. 120 kg pro Spule
Ummantelung der Spulen	Glasfaserverstärktes Epoxy
Wasserkühlung	Kupferrohre an Außenseite der Spule (7 Windungen, 15 mm Außendurchmesser)



Abbildung 3.13: Das drehbare Helmholtz-Spulen-Paar hat einen Durchmesser von 120 cm und einen Spulenabstand von 60 cm

Die Dimensionierung der Spulen gestaltet sich abhängig von ihrem Einsatzgebiet. Für die durchgeführten Messungen war ein starkes homogenes Magnetfeld mit bis zu 50 mT in einem Bereich von etwa 30 cm x 30 cm x 30 cm erforderlich. Die entsprechenden Spezifikationen lassen sich mit Hilfe des Biot-Savart-Gesetzes für kreisförmige Leiter wie folgt berechnen:

$$B(x) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \cdot \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.4)$$

Hier wurde r als Radius und I als angelegte Stromstärke verwendet. Ausgehend davon, dass der Nullpunkt zwischen beiden Spulen in der Mitte liegt, ergibt sich das Magnetfeld in mT als Überlagerung der Felder bei $+r/2$ und $-r/2$. Die Berechnung für diesen Fall erfolgt durch folgende Formel:

$$B\left(\frac{r}{2}\right) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \cdot \frac{r^2}{\left(r^2 + \left(\frac{r}{2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \rightarrow B = \frac{\mu_0 \cdot 8 \cdot I \cdot N}{\sqrt{125} \cdot r} = 1,993 \frac{V \cdot s}{A \cdot m^2} \cdot I \quad (3.5)$$

mit N als Anzahl der Windungen.

Zur Sicherstellung der Homogenität wurde das Helmholtz-Spulen-Paar mit einem 3D-Magnetmesstisch von Stefan Zepter [36] vermessen.



Abbildung 3.14: Im Vordergrund der Messtisch und im Hintergrund das Spulenpaar, in dessen Mitte sich gerade die Hall-Sonde befindet. [36]

Um die Homogenität sicherzustellen wurden mehrere Messpunkte zwischen den beiden Spulen aufgenommen. Die Messungen erfolgten dabei in 20 mm Schritten (siehe Abbildung 3.15).

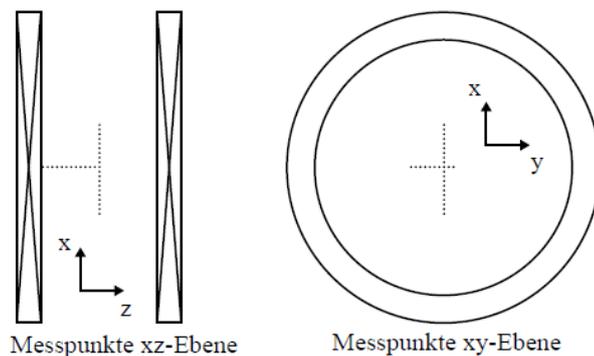


Abbildung 3.15: Definition der Achsen [36]

Die Ergebnisse für die verschiedenen Achsen sind in Abbildung xx aufgezeigt:

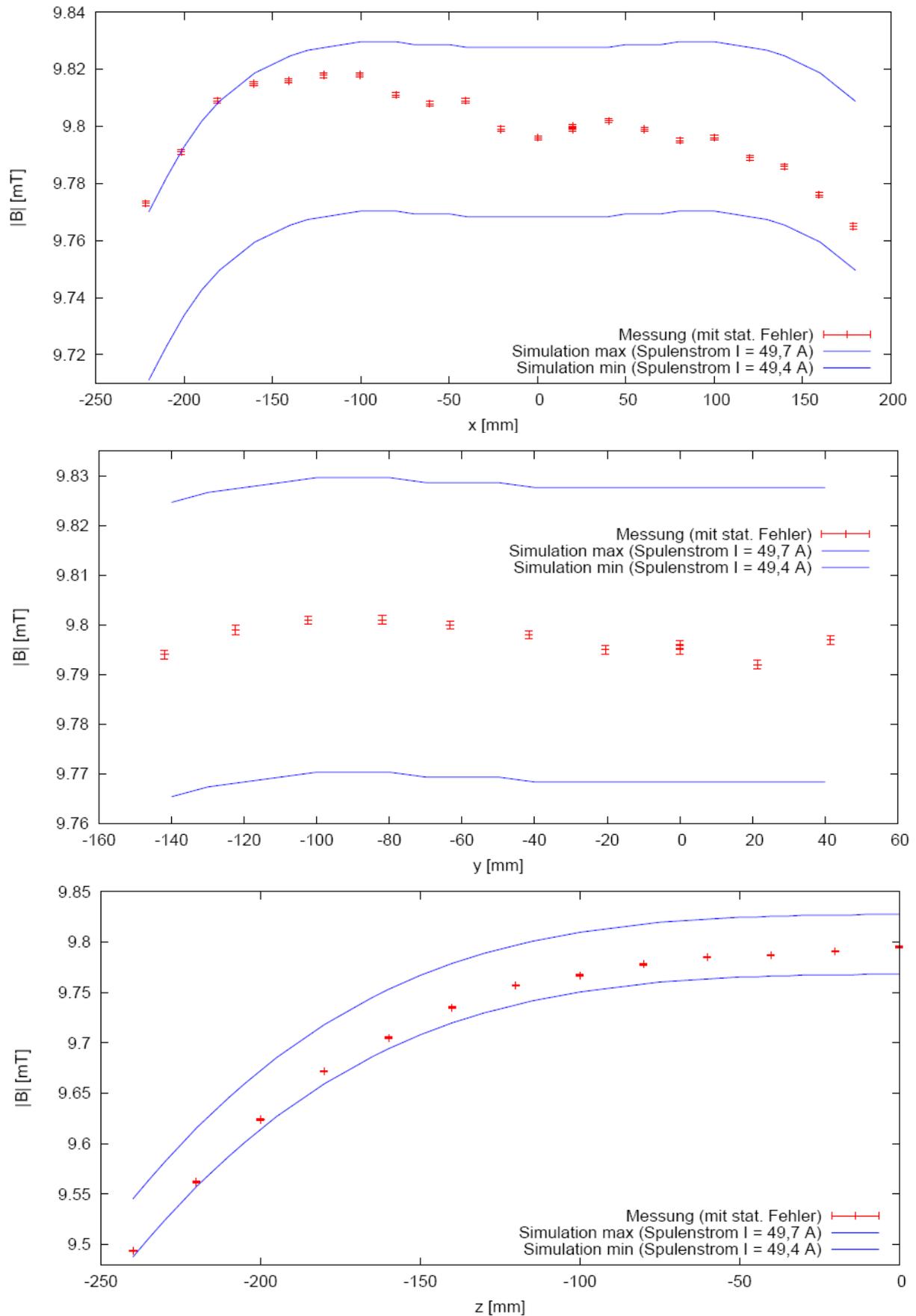


Abbildung 3.16: Messungen des Magnetfeldes für das Helmholtz-Spulen-Paar [36]

Tabelle 3.6: Abweichungen der Homogenität des Magnetfeldes der Helmholtz-Spulen [36]

Richtung	Abweichung	Bereich	Geometrischer Bereich
x	0,2%	9,795 mT zu 9,818 mT	-220 mm bis 180mm
y	0,1%	9,795 mT zu 9,801 mT	-140 mm bis 40 mm
z	0,3%	9,795 mT zu 9,767 mT	-240 mm bis 20 mm

Die Ergebnisse der Messung aus Abbildung 3.16 sind in Tabelle 3.6 zu sehen.

3.3.3 Stromzange

Für die ersten Messungen und vor allem für die Stabilitätstests wurde eine Stromzange des Typs „CT235A“ der Firma Amprobe verwendet, um die angelegte Stromstärke und das daraus resultierende Magnetfeld aufzeichnen zu können. Es besitzt einen Messbereich von 0 - 200 A und eine Genauigkeit von $\pm 1\% \cdot I_{\text{Bereich}} + 0,5A$.



Abbildung 3.17: Das Amprobe CT235A

Die Batterien der Zange haben eine kurze Laufleistung. Da mit abnehmendem Batteriestand der gemessene Strom immer geringer wurde, musste die Erfassung des Stromes manuell durchgeführt werden. Die Stromzange wurde deshalb nur noch für Stabilitätsmessungen verwendet.

Um gleiche Messbedingungen für die verschiedenen Stabilitätstest zu gewährleisten, wurde eine Halterung aus Bosch-Profilen konstruiert, die die Zange in immer gleicher Position hielt und somit vergleichbare Strommessungen ermöglichten (siehe Abbildung 3.18).

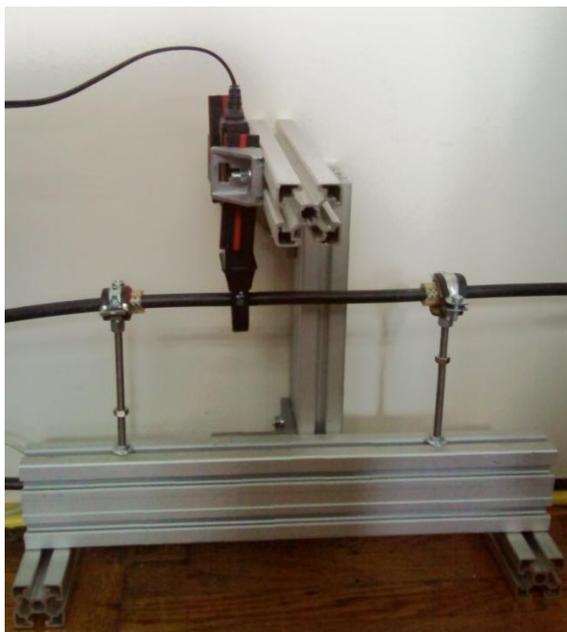


Abbildung 3.18: Die Stromzange in der gebauten Halterung und einer Zuleitung der Spulen

3.4 Datenerfassung

Die Erfassung der Daten wurde mit zwei verschiedenen PCs, mehreren Signalwandlern und des MAG Drive Digital (Controller der TMP) durchgeführt. Die Digitalwandler ermöglichten die Umwandlung des analogen Spannungsabfalls der PT100 Sensoren in digitale Daten.

Die dabei verwendeten Signalumwandler der Firma JUMO vom Typ „TMM-45“ bewirken eine recht genaue Umwandlung des Messsignals. Die Abweichungen liegen in den verschiedenen Bereichen bei den folgenden Werten:

Tabelle 3.7: Abweichungen der JUMO TMM-45-Wandler

Abweichung	Bereich
0,08%	Linearisierungsabweichung
0,05% pro 10K	Abweichung durch Differenz zur Umgebungstemperatur
0,4 K	Abweichung für Widerstandsthermometer
6 mV	Spannungsabweichung für 0V bis 10V

Es wurden vier TMM-45-Wandler verwendet um damit die Flanschttemperatur, die Gehäusetemperatur, die Stromstärke über die Stromzange und die Pyrometerspannung auszulesen.

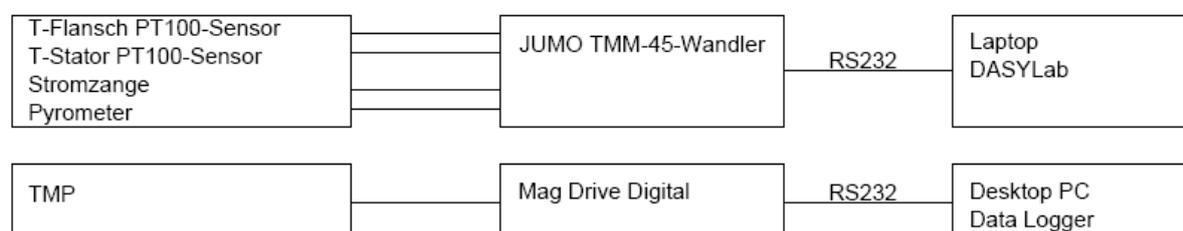


Abbildung 3.19: Schaltplan der Messvorrichtung

Das Auslesen der JUMO-Daten wurde mit Hilfe des Programms „DASY Lab“ bewältigt, das die Visualisierung und die Datenaufnahme ermöglicht. Die Daten der TMP wurden über das Programm „DataLogger“ der Firma Leybold am Desktop PC aufgenommen.

Diese Art der Datenerfassung stellte sich als recht problematisch dar, da beide Programme einzeln von Hand gestartet werden mussten. Daraus resultierte eine leichte Verzögerung in der Synchronität. Zusätzlich stellte sich heraus, dass „DataLogger“ keine genaue Aufnahme der Daten ermöglichte, da mit fortlaufender Zeit Sekunden übersprungen wurden. Die Verringerung des Datenaufkommens durch Vergrößerung der einzelnen Messschritte oder Wegfall von Parametern führte zu keiner Lösung des Problems. Außerdem liefen die internen Uhren der beiden PCs unterschiedlich schnell.

Entsprechend mussten die Messdaten nach ihrer Erfassung noch bearbeitet werden, um eine möglichst genaue zeitliche Übereinstimmung zu erreichen. Die maximale Asynchronität betrug dabei 15 Sekunden.

Um diese Fehlerquelle zu beseitigen wurde mit dem Aufbau eines neuen Messsystems auf Basis von Labview begonnen, welche im folgenden Kapitel 3.5. genauer beschrieben wird.

3.5 Neue Datenerfassung

Das Ziel der neuen Datenerfassung ist eine nahezu perfekte Synchronisierung der Daten zu erhalten, da nur noch ein PC und ein Programm verwendet werden sollen. Alle Daten laufen dann im Programm „Labview“ zusammen. Für die Temperaturerfassung über die PT-100 Sensoren wurden mehrere Analog/Digital-Wandler und Verstärker der Firma „Weidmüller“ auf eine Schiene gebaut. Es wurden zusätzliche Messkanäle eingebaut, die auch noch die Spulentemperatur oder die Kühlwassertemperatur direkt im PC aufnehmen zu können.



Abbildung 3.20: Aufreihung der Signalwandler für die PT100-Sensoren und der analogen Signale von Pyrometer, Gasfluss und Magnetfeld

Die Temperatursensoren und die analogen Eingänge wurden mit dem PC selbst über eine Steckkarte von „National Instruments“ verbunden und dann über „Labview“ ausgelesen. Mit Hilfe der Wandler war es auch möglich das Analogsignal des Gasflussmeters auszulesen und den aktuellen Gasfluss in die Daten aufzunehmen. Eine direkte Ansteuerung des PR4000 war nicht möglich, da kein Kontakt über die RS232 Schnittstelle aufgebaut werden konnte.

Die Stromstärke selbst lässt sich über die Messung des Spannungsabfalls an einer Messbrücke direkt an den Spulen greifen. Diese Messbrücke besteht aus Kupfer und besitzt einen Widerstand von $0,1\Omega$. Daraus resultiert ein Signal von 25V. Bei den alten Messungen konnte nicht darauf zurückgegriffen werden, da die JUMO Signalwandler nur Signale zwischen 0 V und 10 V verarbeiten konnten. Aufgrund des Ausfalls des Pyrometers konnte die neue Datenerfassung im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr vollständig in Betrieb genommen werden.

4 Messungen

Für die Bestimmung der Konstanten k_i des Modells wurden mehrere Messreihen mit verschiedenen Magnetfeldern und Gasflüssen angesetzt. Da das Magnetfeld aber nicht nur zur Erwärmung beiträgt, sondern auch eine Kraft auf den Rotor ausübt, wurden im Vorfeld Stabilitätstests durchgeführt. Alle Messungen, bis auf die in Kapitel 4.3 beschriebenen, wurden mit einer Kühlwassertemperatur von $T_k=20^\circ\text{C}$ aufgenommen. In den folgenden Abbildungen wird eine Feldausrichtung senkrecht zur Rotorachse mit „B90°“ gekennzeichnet. Ein Feld parallel zur Rotorachse wird mit „B0°“ bezeichnet. Zur Übersichtlichkeit der Diagramme wurde für die Stabilitätsmessungen die Einheit „Gauss“ für das Magnetfeld gewählt. Für alle anderen Messungen wurde die Einheit „mT“ verwendet.

4.1 Stabilitätsmessungen

Das angelegte Magnetfeld hat je nach Feldstärke und Ausrichtung starke Auswirkungen auf die Stabilität, den Motorstrom und die Frequenz des Rotors. Die Positionssensoren des magnetischen Lagers der TMPs wurden bei unterschiedlichen Spulenneigungen und Rotorfrequenzen mit stetig wachsendem Magnetfeld aufgezeichnet. Die Auslenkung wird dabei an drei verschiedenen Stellen gemessen und in Form einer Spannung ausgegeben.

Der Umrechnungsfaktor beträgt ca. $22,5 \pm 2,5 \text{ mV}/\mu\text{m}$.

4.1.1 MAG W 2200

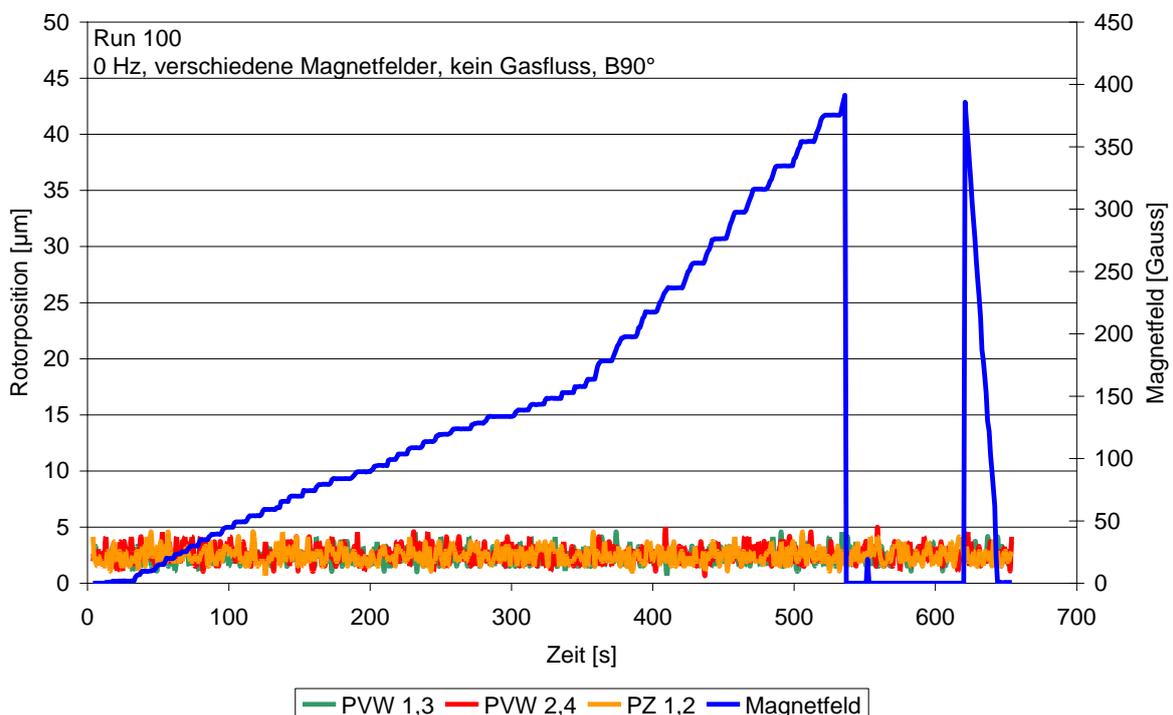


Abbildung 4.1: Positionsparameter Run 100

Um die TMP nicht zu gefährden wurden erste Messungen bei stehendem Rotor und bei eingeschaltetem Magnetlager gemacht. In Abbildung 4.1 ist deutlich zu erkennen, dass die Einwirkung eines Magnetfelds senkrecht zur Rotorachse auf den stillstehenden Rotor keine Auswirkung hat und das Magnetlager dies problemlos ausgleichen kann. Entgegen der im Diagramm dargestellten Kurve für das Magnetfeld wurde es nicht abgeschaltet, sondern überstieg nur den Messbereich der dafür verwendeten Stromzange. Die Strom- bzw. Magnetfeldstärke wurde bis 450 G erhöht.

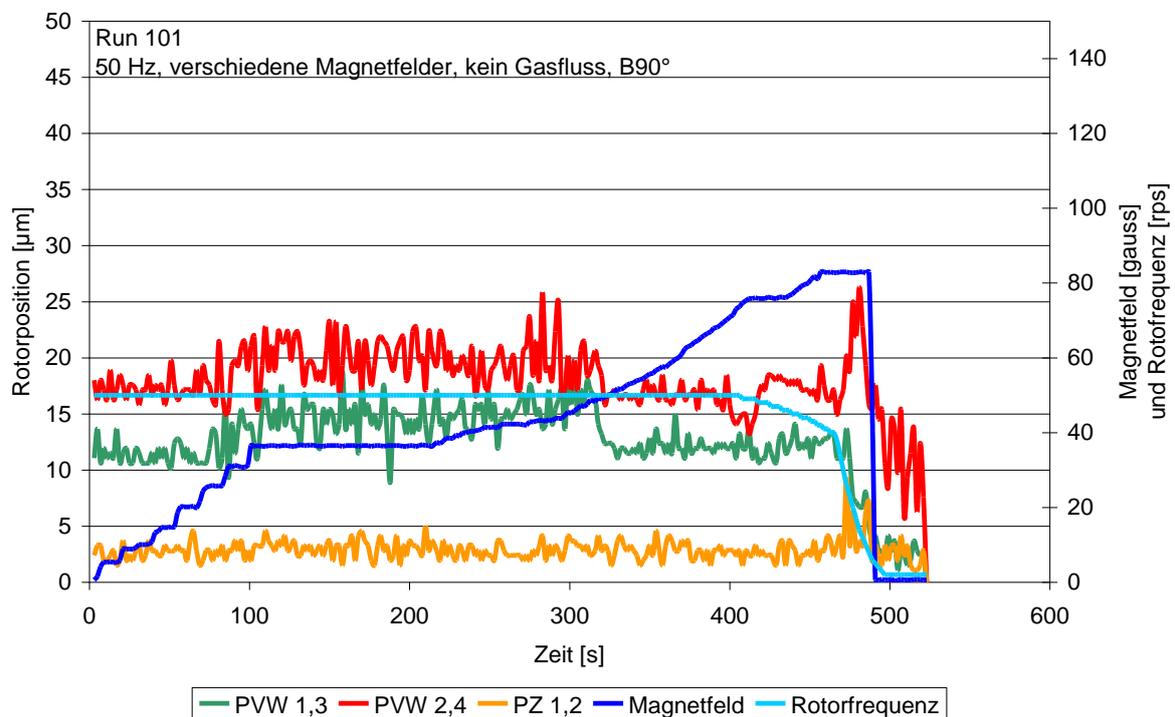


Abbildung 4.2: Positionsparameter Run 101

Sobald die Messungen mit laufendem Rotor, in diesem Fall 50 Hz (Abbildung 4.2), durchgeführt wurden, zeigten sich erste Auswirkungen auf die Rotorposition durch das Magnetfeld. Die erzeugten Wirbelströme führen, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, nicht nur zu einer Erhitzung des Rotors, sondern auch zu einem Bremseffekt der durch den Motor ausgeglichen werden muss. Ab einer Feldstärke von 74 G war diese Abbremsung so stark, dass der Motor sie nicht mehr kompensieren konnte. Die Rotorfrequenz kann nicht weiter aufrecht erhalten, wenn der maximale Motorstrom von ca. 4,2 A erreicht wird. Nach etwa 30 Sekunden wird die Rotorfrequenz automatisch reduziert.

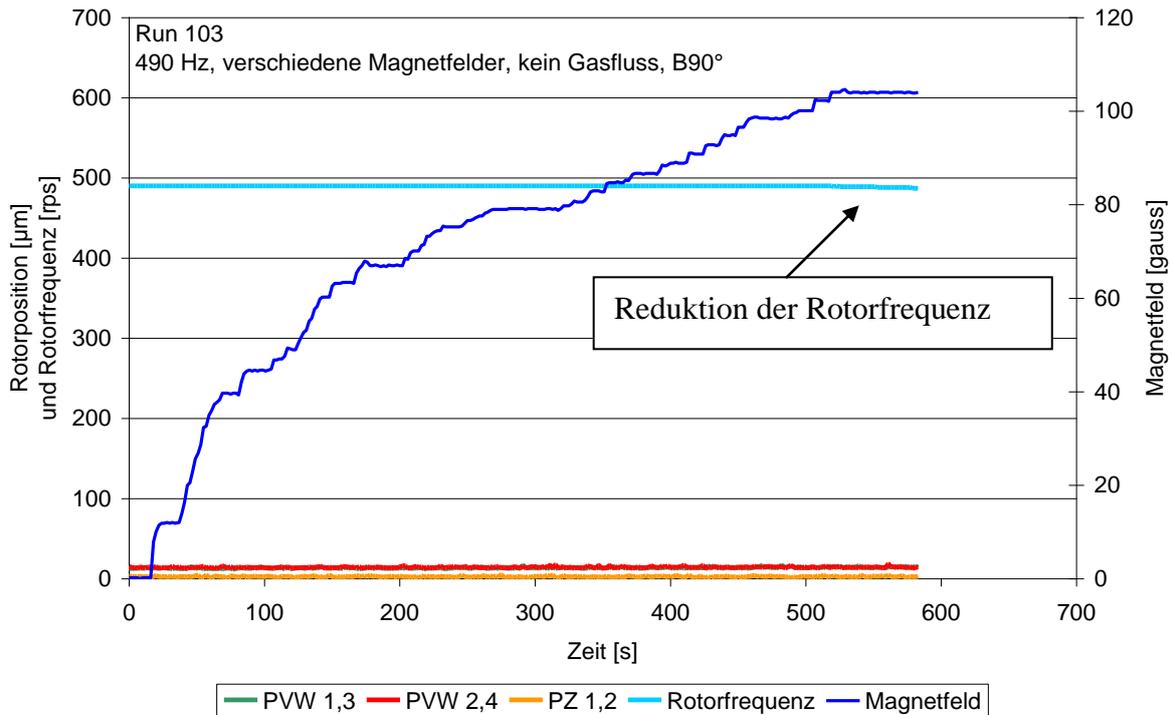


Abbildung 4.3: Positionsparameter Run 103

Die darauffolgende Messung (Abbildung 4.2) erfolgte mit einer Frequenz von 490Hz. Der Vergleich der Messwerte zeigt eine deutliche Erhöhung der benötigten Magnetfeldstärke (104 G) um eine Verlangsamung des Rotors zu erreichen. Zudem sind die Positionsparameter wesentlich stabiler. Die bessere Stabilität ist auf den höheren Drehimpuls zurückzuführen, und damit das höhere Drehmoment, das vom Magnetfeld auf den Rotor ausgeübt werden muss um ihn auszulenken. Die höhere Feldstärke, bei der die TMP den maximalen Motorstrom erreicht, ist dadurch zu erklären, dass die Leistung des Motors proportional zum Motorstrom (Drehmoment) und zur Rotorfrequenz ω ist, wogegen die Bremswirkung durch Wirbelströme nur mit $\sqrt{\omega}$ steigt (siehe Kapitel 2.1).

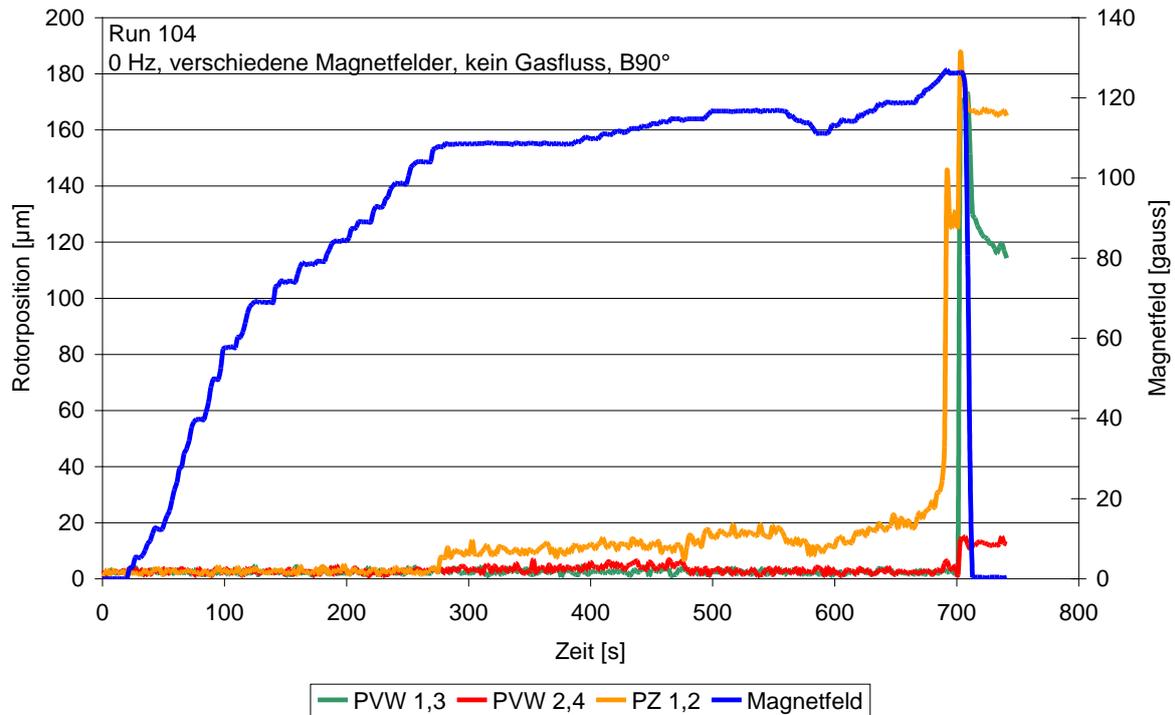


Abbildung 4.4: Positionsparameter Run 104

Die Umstellung der Spulen auf eine parallele Ausrichtung führte nicht wie zuvor auf eine völlige Unabhängigkeit der Positionsparameter bei 0 Hz, sondern zu massiven Auslenkungen bis hin zum Versagen des Magnetlagers. Bereits ab 107 G kommt es zu einer deutlichen Erhöhung des PZ 1,2-Parameters. Bei Erreichen von 125 G kam es schließlich zu einer Fehlermeldung am MAG Drive Digital. Der Rotor war durch das Magnetfeld aus dem Toleranzbereich der Magnetlager gehoben worden und fiel in das Notlager der Pumpe. Der Fehler konnte durch Aus- und Einschalten wieder beseitigt werden. Für die nachfolgenden Messungen mit bewegtem Rotor wurden die Messungen bereits vor dem Versagen des Magnetlagers abgebrochen um die TMP zu schonen und nicht zu beschädigen.

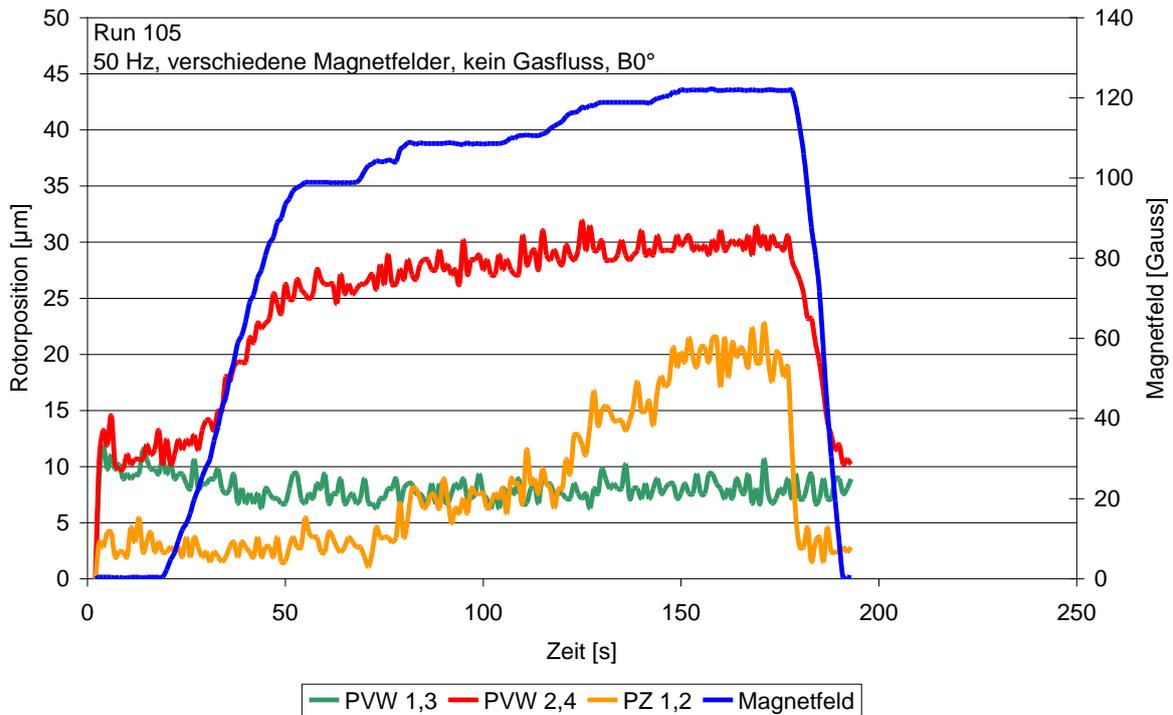


Abbildung 4.5: Positionsparameter Run 105

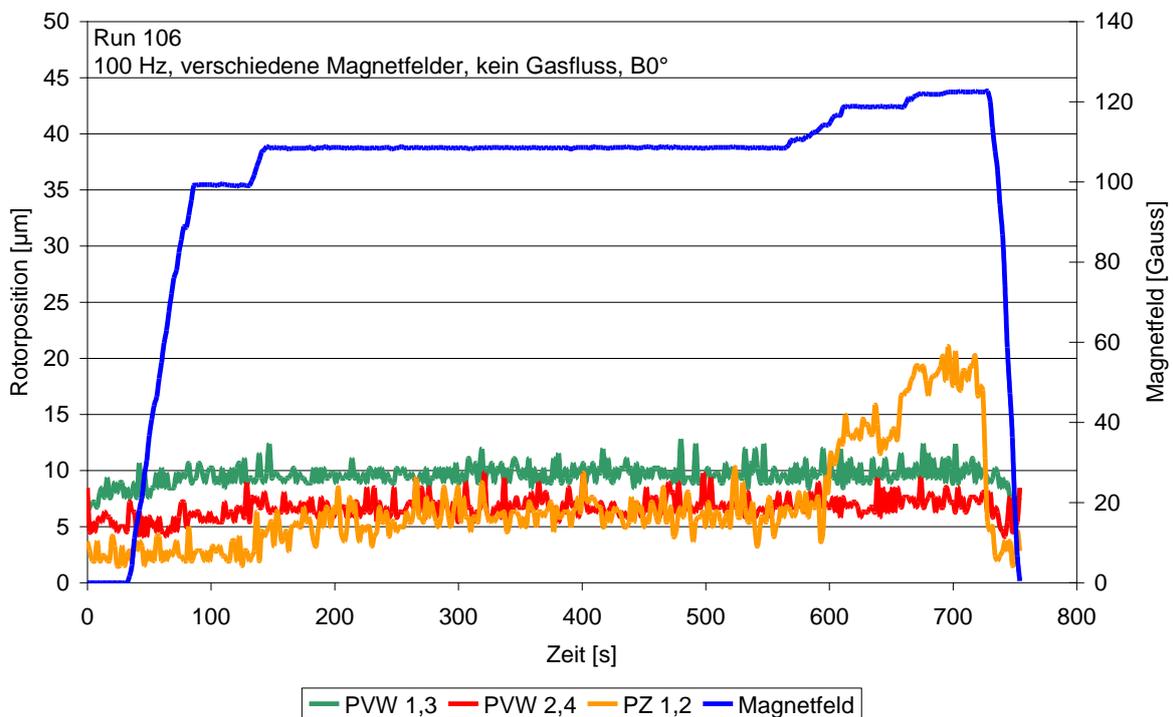


Abbildung 4.6: Positionsparameter Run 106

Wenn der Rotor mit einer Frequenz von 50 Hz bzw. 100 Hz betrieben wurde, zeigte sich keine Verringerung der Rotorfrequenz, da bei paralleler Ausrichtung fast keine Wirbelströme auftreten und damit auch keine Abbremsung stattfindet. Für Messungen mit parallelem Feld sind somit nur die Positionsparameter zu beachten.

Der direkte Vergleich der Messungen mit parallelem Magnetfeld zeigt deutlich, dass unabhängig von der Rotorfrequenz die Feldstärke für den kritischen Bereich der Positionsparameter gleich bleibt. Dies erschließt sich auch aus der Tatsache, dass der Drehimpuls den Rotor nur gegen Drehmomente senkrecht zur Achse stabilisiert und nicht in z-Richtung, was hier der Fall ist.

Die letzte Messreihe sollte das Verhalten des Rotors bei einer Spulenausrichtung von $B = 45^\circ$ untersuchen. In dieser Ausrichtung sollten vergleichbare Ergebnisse zu den Messungen mit 0° und 90° erreichbar sein, wenn eine Magnetfeldstärke, die um den Faktor $\sqrt{2}$ größer ist, erreicht wird. Dieser Faktor ist auf geometrische Überlegungen des Magnetfeldvektors zurückzuführen, da sich bei einem Winkel von 45° für das resultierende Magnetfeld folgendes Verhältnis ergibt:

$$\begin{aligned} B_{\text{Senkrecht}} &= B \cdot \sin \alpha \\ B_{\text{Parallel}} &= B \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (4.1)$$

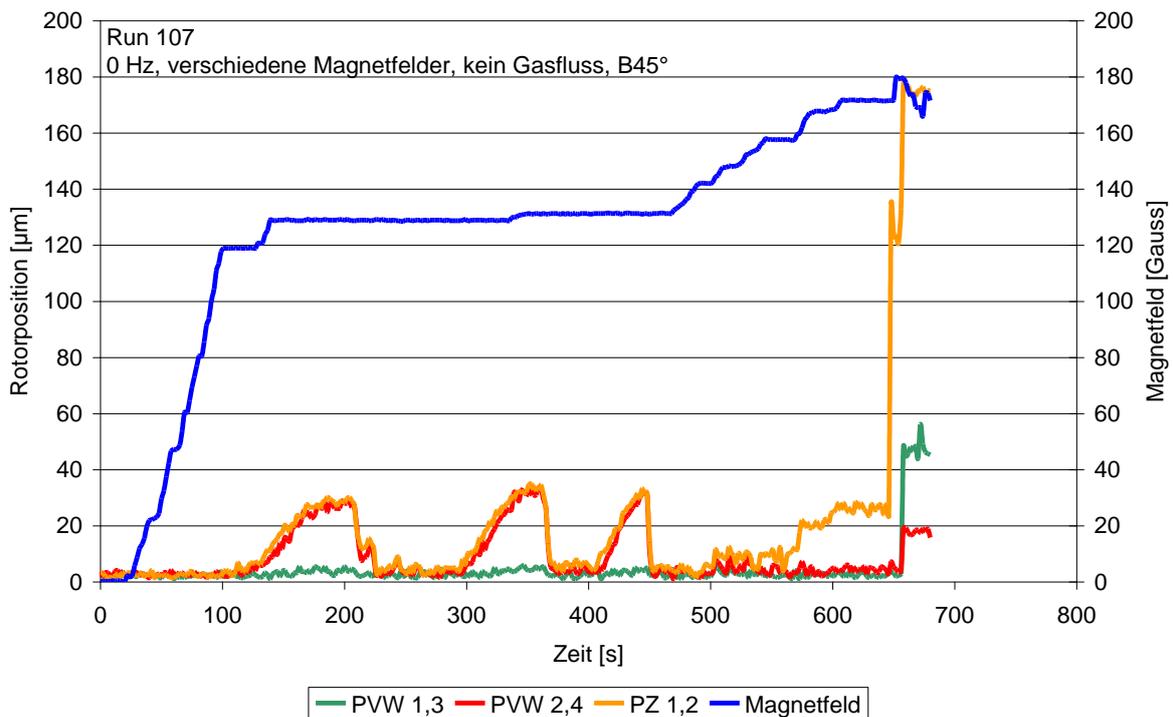


Abbildung 4.7: Positionsparameter Run 107

Bereits die erste Messung zeigte unerwartete Ergebnisse wie an obigem Diagramm (Abbildung 4.7) zu erkennen ist. Aufgrund der Tatsache, dass die Pumpe still steht sollte es nicht zu starken Schwankungen der Positionsparameter kommen. Jedoch zeigt sich bei Erreichen von 120 G eine starke Vibration der Pumpe, welche sich in den drei Peaks der Positionsparameter auf dem Diagramm widerspiegelt. Obwohl ein konstantes Magnetfeld angelegt wurde, war der resultierende Strom nicht perfekt konstant. Daher lag ein geringfügig schwankendes Magnetfeld am Rotor an, welches vom magnetischen Lager kompensiert werden musste. Die ständige Ausrichtung erreichte genau die Resonanzfrequenz des Pumpentisches und führte damit zur Vibration des ganzen Messtisches. Zur Beseitigung dieser Vibration wurde die Pumpe mit der Hand festgehalten, was das Verschwinden der Peaks im obigen Diagramm erklärt. Um die Messergebnisse nicht weiter zu verfälschen wurde die Pumpe nachdem dritten Peak dauerhaft festgehalten.

Die weitere Analyse der Daten zeigte, dass die erwartete Erhöhung des Magnetfeldes um den Faktor $\sqrt{2}$ im Vergleich zu Run 105 zu beobachten war.

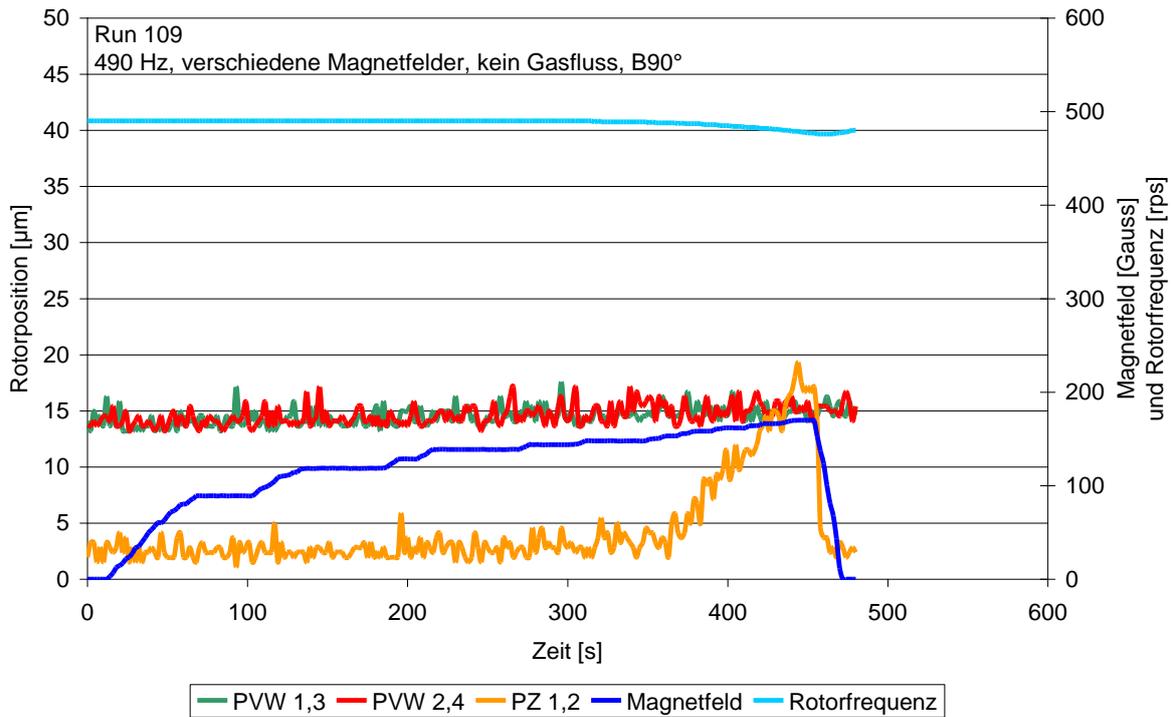


Abbildung 4.8: Positionsparameter Run 109

Durch Erhöhung der Rotorfrequenz auf 490 Hz kommt es bei einer Ausrichtung von 45° zu einer Kombination von beiden zuvor aufgetretenen Effekten. Es tritt sowohl eine Reduktion der Rotorfrequenz als auch eine Abweichung der Positionsparameter auf. Der Vergleich mit den Parametern aus den 0° bzw. 90° Messungen bestätigt die erwartete Erhöhung der kritischen Feldwerte um den Faktor $\sqrt{2}$.

Tabelle 4.1: Übersicht über die Grenzwerte der Stabilitätstests (MAG W 2200)

Run-Nr.:	Rotorfrequenz	Feldrichtung	Kritische Werte
100	0 Hz	90°	keine
101	50 Hz	90°	abnehmende Rotor-Frequenz bei 73G
103	490 Hz	90°	abnehmende Rotor-Frequenz bei 104G
104	0 Hz	0°	kritische Positionsparameter bei 126G
105	50 Hz	0°	kritische Positionsparameter bei 121G
106	100 Hz	0°	kritische Positionsparameter bei 122G
107	0 Hz	45°	kritische Positionsparameter bei 170G
109	490 Hz	45°	abnehmende Rotor-Frequenz bei 147G Kritische Positionsparameter bei 170G

4.1.2 MAG W 2800

Entsprechend den Tests mit der MAG W 2200 wurde auch einige Messungen mit der MAG W 2800 durchgeführt. Da viele Messungen bereits mit der MAG W 2200 durchgeführt wurden, deckt die Messung mit der MAG W 2800 nur die wichtigsten Bereiche ab. Die MAG W 2800 verwendet das gleiche Magnetlager wie die MAG W 2200, weshalb ähnliche Grenzwerte zu erwarten sind.

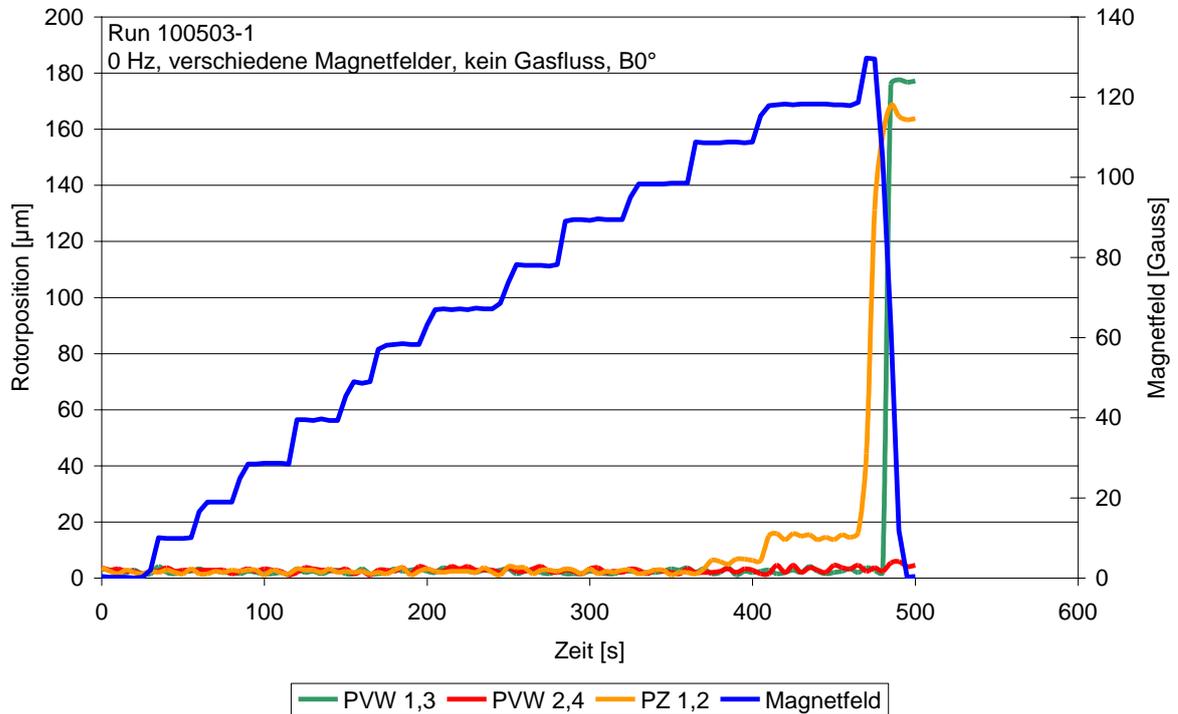


Abbildung 4.9: Positionsparameter Run 100503-1

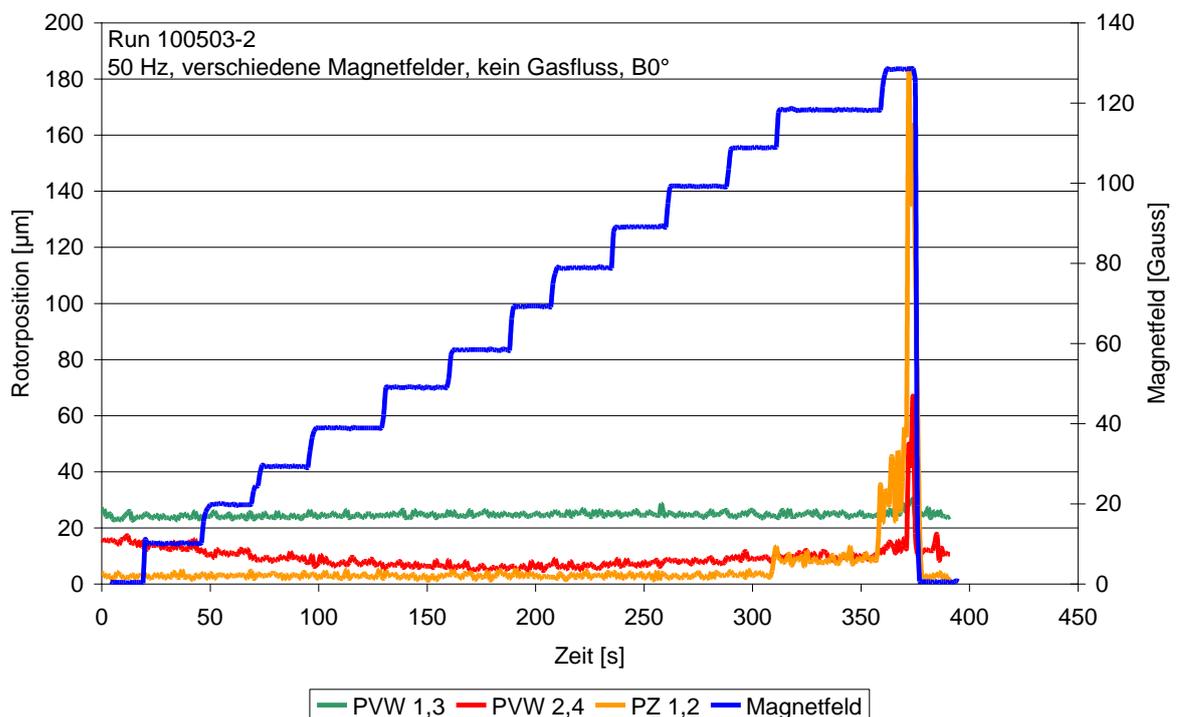


Abbildung 4.10: Positionsparameter Run 100503-2

Wie schon bei der MAG W 2200 erhalten wir auch hier unter einer Spulenausrichtung von 0° starke Schwankungen in den Positionsparametern aber keinerlei Verringerung der Rotorfrequenz. Die Positionsparameter wurden wieder bis zum Auftreten der Fehlermeldung an der MagDrive Digital aufgenommen. Für die MAG W 2800 erhalten wir in diesem Fall ein maximales Magnetfeld von 116G für Run 100503-1 und 115G für Run 100503-2.

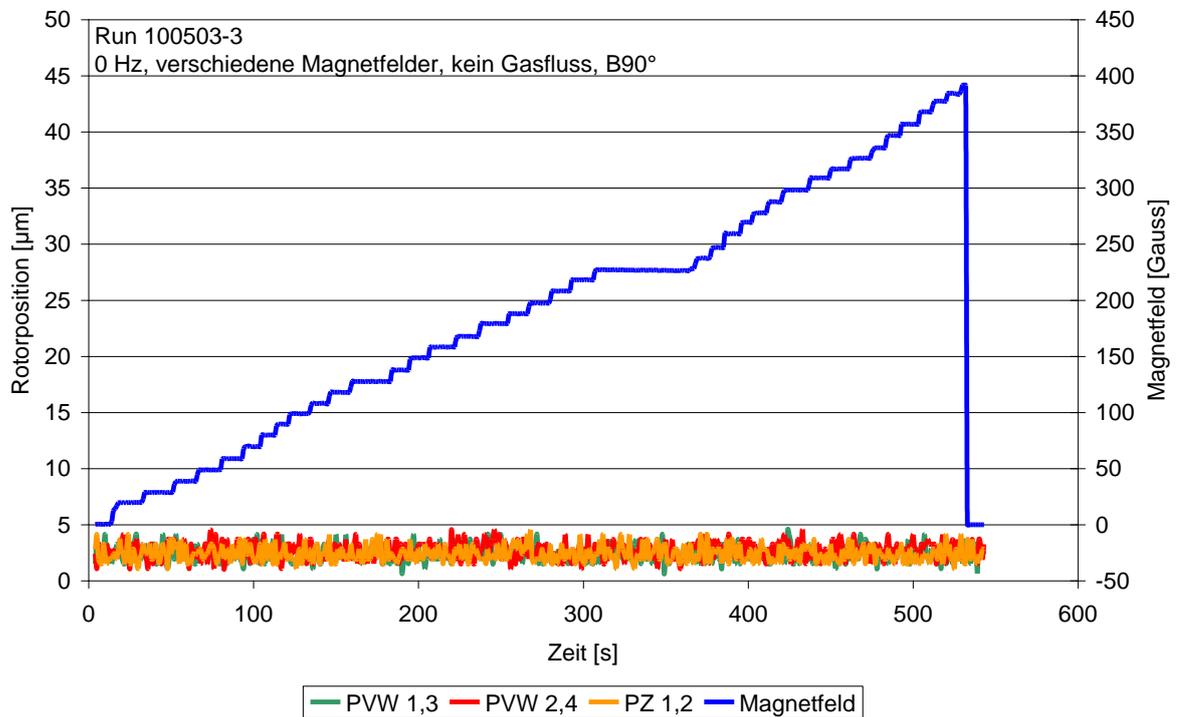


Abbildung 4.11: Positionsparameter Run 100503-2

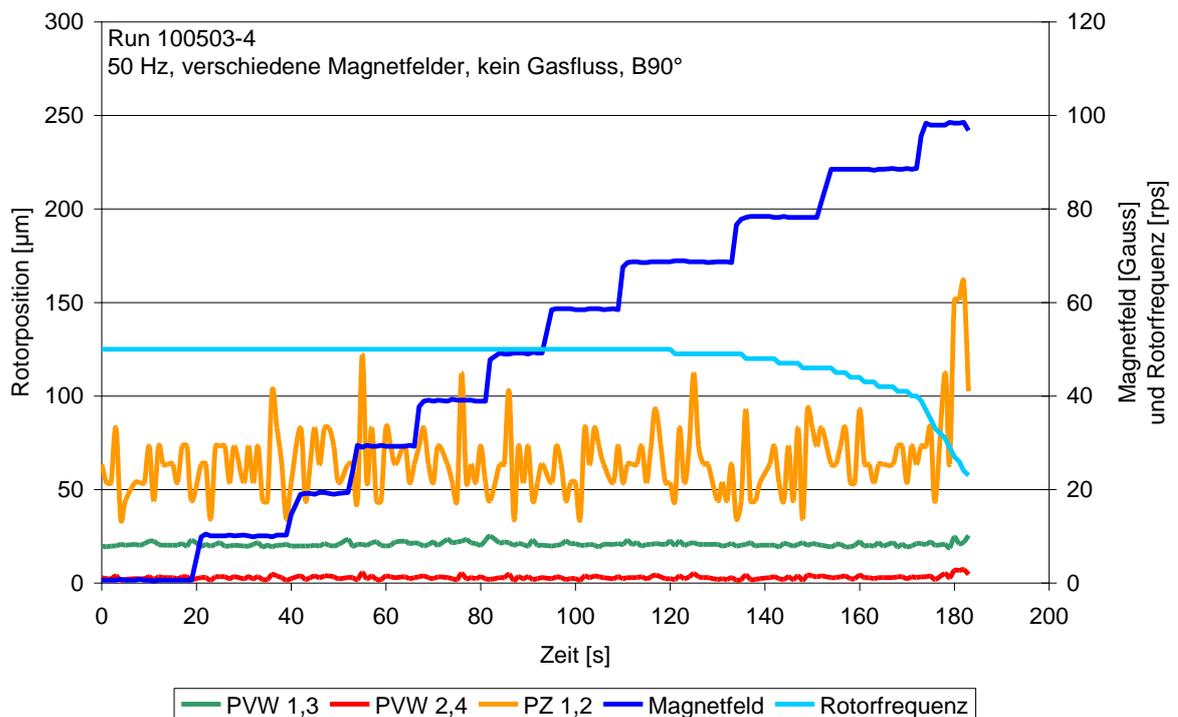


Abbildung 4.12: Positionsparameter Run 100503-4

Bei einer Ausrichtung der Spulen auf 90° stellte sich wieder ab einer bestimmten Feldstärke eine Verringerung der Rotorfrequenz ein. In Run 100503-3 zeigt sich eine völlige Unabhängigkeit der Positionsparameter vom angelegten Magnetfeld. Die Erhöhung der Frequenz auf 50 Hz führt bei zunehmender Erhöhung des Magnetfeldes zu einer Verringerung der Rotorfrequenz ab ca. 69G. Der direkte Vergleich aller Stabilitätsmessungen zur MAG W 2200 und MAG W 2800 zeigt eine Übereinstimmung mit nur geringen Abweichungen in den Grenzwerten.

4.2 Temperaturmessungen mit Magnetfeld und/oder Gasfluss

4.2.1 Temperaturmessung mit Gasfluss

Zur Veranschaulichung des Effekts der Gasreibung und der Konvektion wurden mehrere Messungen mit verschiedenen Stickstoffgasflüssen durchgeführt. Messungen mit Helium waren an der MAG W 2200 nicht durchführbar, da die Rotorfrequenz selbst bei kleinen Heliumgasflüssen nicht aufrecht erhalten werden konnte. Der Grund für dieses Verhalten liegt im atomaren Gewicht von Helium. Im Vergleich zu Luft oder Stickstoff besitzt es einen Faktor 7 geringere atomare Masse und hat damit eine wesentlich größere mittlere Geschwindigkeit, was wiederum in einer geringeren Kompression am unteren Ende der TMP resultiert. Das Helium wird damit schlechter gepumpt und die benötigte Motorleistung erhöht. Die zum Abpumpen von kleinen Heliumflüssen benötigte Leistung war so groß, dass die TMP auch mit kaskadierter kleiner TMP die Leistung nicht aufbringen konnte.

4.2.1.1 MAG W 2200

Die Messungen mit der MAG W 2200 erfolgten alle mit Stickstoff, laufender Vorpumpe und wurden erst nach Erreichen der Leerlaufgleichgewichtstemperatur gestartet. Die kleine TMP wurde nicht zugeschaltet, sondern über einen Bypass überbrückt.

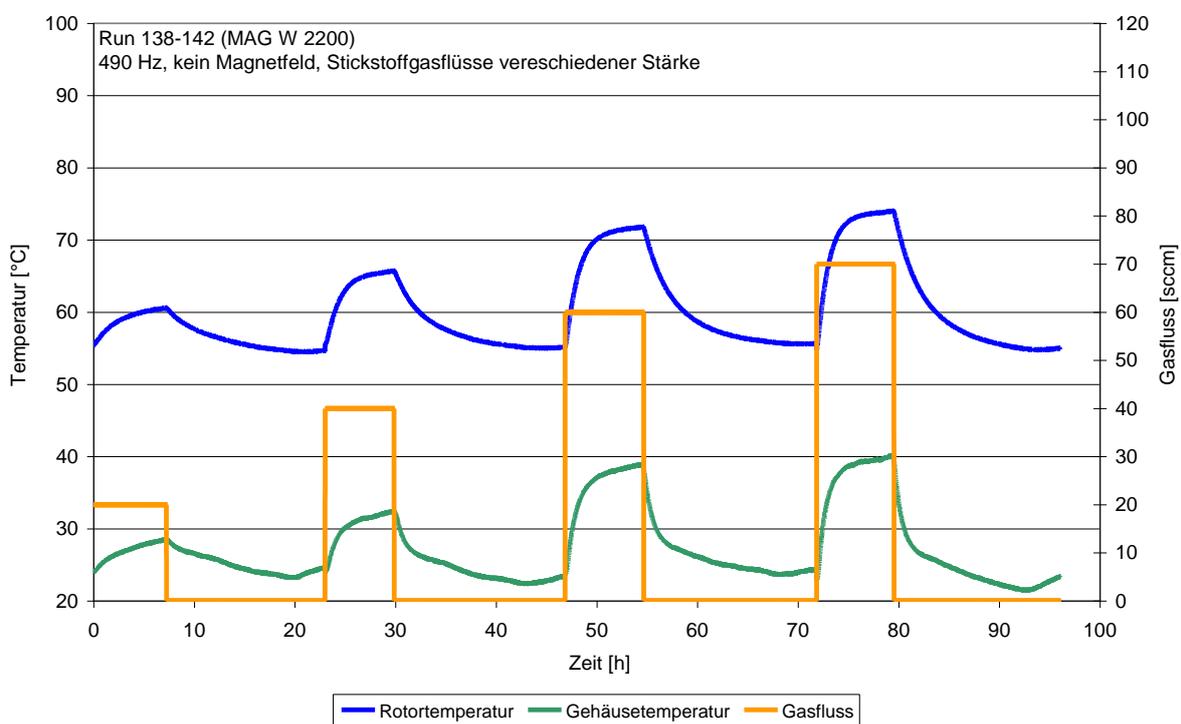


Abbildung 4.13: Rotortemperatur in Abhängigkeit von Stickstoffgasfluss

Das Diagramm (Abbildung 4.13) zeigt deutlich, dass die Temperatur mit steigendem Gasfluss zunimmt, da der Reibungseffekt den Kühleffekt durch Konvektion zumindest in diesem Temperaturbereich übersteigt. Die Erwärmung erreicht bei 70 sccm ihren Höchstwert von 74,2 °C. Auffällig ist die starke Erhitzung des Gehäuses, da dieses Temperaturen bis 40 °C erreicht. Werden diese Daten nun mit Modell 1 gefittet, resultiert daraus folgendes Diagramm.

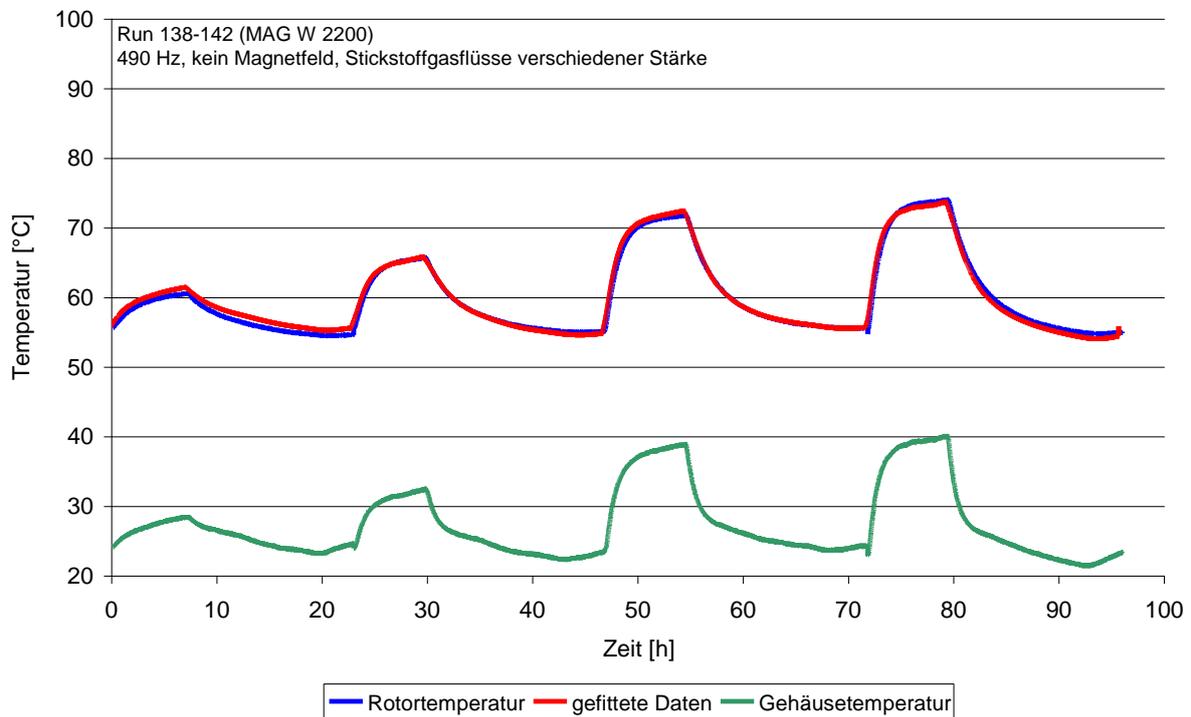


Abbildung 4.14: gefittete Rotortemperatur im Vergleich mit den Messwerten der Stickstoffgasflussmessung

Abbildung 4.14 zeigt deutlich, dass das entwickelte theoretische Modell 1 sehr gut mit den gemessenen Daten übereinstimmt und liefert für die Konstanten die nachfolgenden Werte.

Tabelle 4.2: Konstanten aus Modell 1 mit gemessener Statortemperatur und Gasfluss, Run 138-142 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k_1 [W·K/J·mT ²]	0	0
k_2	k_2 [W·K/J]	14	$1,2 \cdot 10^{-1}$
$k_3 Q$	k_3 [W·K/J·sccm]	1,42	$4,7 \cdot 10^{-2}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k_4 [W/J]	$4,07 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k_5 [W/J·K ³]	$3,62 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-11}$

Der zusätzliche Faktor 100 resultiert aus der Vergleichbarkeit mit den alten Ergebnissen, da zuvor für die Magnetfeldstärke die Einheit Gauss verwendet wurde.

Da bei Designstudien die Gehäusetemperatur nicht bekannt ist, wurde noch ein Fit für eine konstante Gehäusetemperatur von 25 °C durchgeführt.

Tabelle 4.3: Konstanten von Modell 1 aus der Temperaturmessung mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ und Gasfluss, Run 138-142 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k_1 [W·K/J·mT ²]	0	0
k_2	k_2 [W·K/J]	9,16	$5,0 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k_3 [W·K/J·sccm]	$1,90 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - 25^\circ\text{C}) Q$	k_4 [W/J]	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
$-k_5 (T_r^4 - 25^4 \text{C}^4)$	k_5 [W/J·K ³]	$2,46 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$

4.2.1.2 MAG W 2800

Entsprechend der MAG W 2200 wurden ähnliche Messungen mit der MAG W 2800 durchgeführt. Es wurde auch hier Stickstoff verwendet, allerdings mit verschiedenen Gasflussstärken (27,6 sccm ; 60 sccm; 70 sccm).

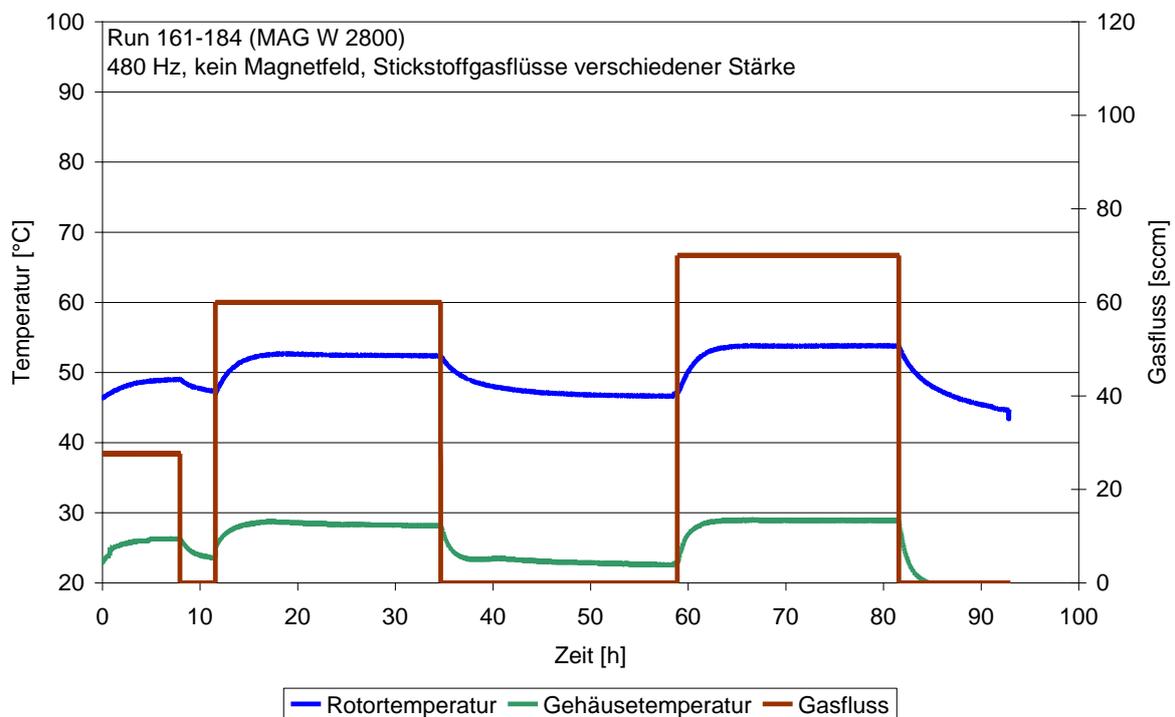


Abbildung 4.15: Rotortemperatur in Abhängigkeit von Stickstoffgasfluss

Auch hier lässt sich die Abhängigkeit der Gehäusetemperatur vom Gasfluss gut demonstrieren. Die Temperaturverläufe von Rotor und Gehäuse sind von der Form her fast identisch. Der direkte Vergleich der Messungen mit dem gefitteten Modell 1 ergibt schließlich folgende Ergebnisse:

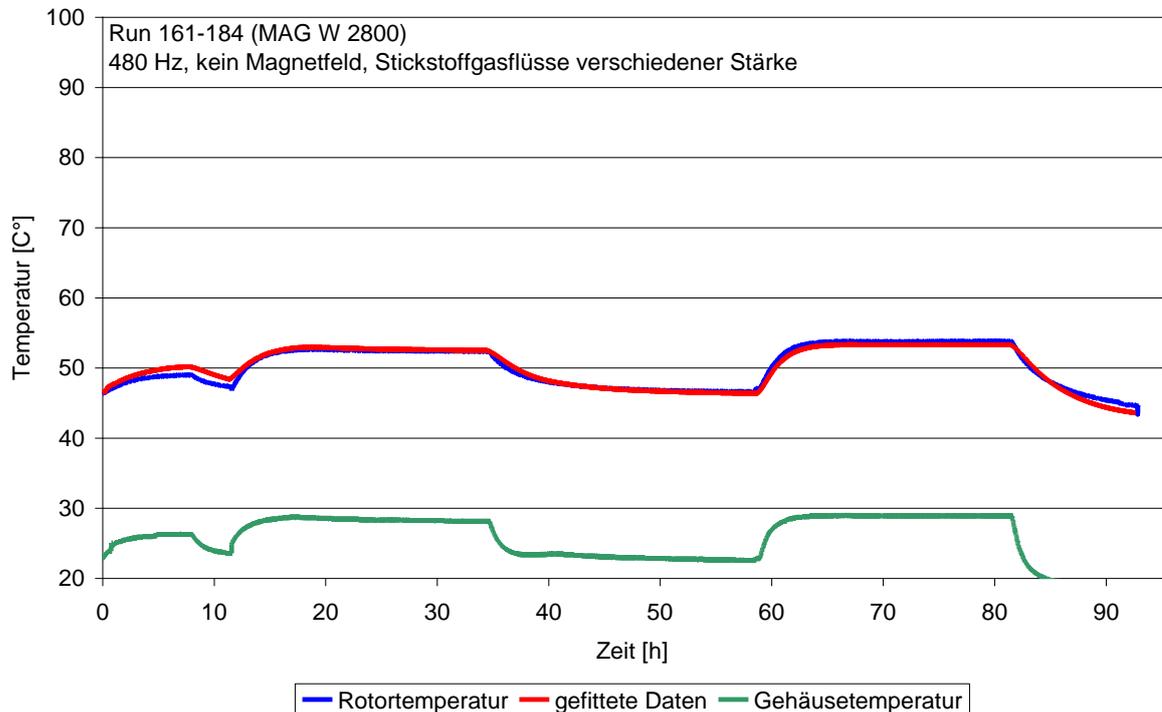


Abbildung 4.16: gefittete Rotortemperatur im Vergleich mit den Messwerten der Stickstoffgasflussmessung

Erneut gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen der gefitteten Kurve und den gemessenen Werten. Aus Abbildung 4.16 ergeben sich folgende Konstanten:

Tabelle 4.4: Konstanten von Modell 1 aus der Temperaturmessung mit gemessener Gehäusetemperatur und Gasfluss, Run 161-184 (MAG W 2800)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·mT ²]	0	0
k_2	k2 [W·K/J]	6,44	$1,0 \cdot 10^{-1}$
$k_3 Q$	k3 [W·K/J·sccm]	$2,15 \cdot 10^{-1}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k4 [W/J]	$8,46 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k5 [W/J·K ³]	$2,33 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-11}$

Der Fit mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ ergibt folgende Parameter:

Tabelle 4.5: Konstanten der Temperaturmessung mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ und Gasfluss, Run 161-184 (MAG W 2800)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k_1 [W·K/J·mT ²]	0	0
k_2	k_2 [W·K/J]	9,15	$1,4 \cdot 10^{-1}$
$k_3 Q$	k_3 [W·K/J·sccm]	$5,26 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - 25^\circ\text{C}) Q$	k_4 [W/J]	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
$-k_5 (T_r^4 - 25^4 \text{C}^4)$	k_5 [W/J·K ³]	$3,59 \cdot 10^{-9}$	$5,1 \cdot 10^{-11}$

4.2.1.3 Diskussion der Ergebnisse mit Gasfluss

Der Vergleich der beiden Messungen aus Abbildung 4.13 und Abbildung 4.15 weist einen deutlichen Unterschied zwischen den Rotor- und Gehäusetemperaturen der beiden Pumpen auf. Die MAG W 2200 wird wesentlich wärmer als die MAG W 2800. Dies spiegelt sich auch bei einer Gegenüberstellung der berechneten Konstanten wieder. Bereits bei den Gleichgewichtstemperaturen besitzt die MAG W 2200 eine um 9 °C höhere Temperatur als die MAG W 2800 (55 °C zu 46 °C), was sich auch in der k_2 -Konstante (14 zu 6,436) ausdrückt. Die Gehäusetemperaturen liegen im gleichen Bereich. Für die Maximaltemperatur bei 70 sccm der beiden Runs ergeben sich die in Tabelle 4.6 aufgezeigten Ergebnisse. Die Leistungen wurden mit den angegebenen Werten und den Termen aus Modell 1 berechnet.

Tabelle 4.6: Vergleich der Leistungsbeiträge bei Messungen mit Gasfluss

Term	MAG W 2200 $T_r = 74,01^\circ\text{C}$ $T_s = 40,06^\circ\text{C}$ $Q = 70$ sccm Berechnete Leistung [W] / (m·c)	MAG W 2800 $T_r = 53,74^\circ\text{C}$ $T_s = 28,06^\circ\text{C}$ $Q = 70$ sccm Berechnete Leistung [W] / (m·c)
k_2	$14 \pm 0,1$	$6,436 \pm 0,1$
$k_3 Q$	$99,05 \pm 3,3$	$15,06 \pm 0,6$
$k_4 (T_r - T_s) Q$	$-96,79 \pm 3,4$	$-15,20 \pm 0,6$
$k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	$-17,76 \pm 0,1$	$-7,422 \pm 0,1$

Betrachtet man die Konstante k_3 ($1,415$ W/sccm zu $2,152 \cdot 10^{-1}$ W/sccm) und die daraus resultierenden Leistungsbeiträge, so zeigt sich deutlich, dass die MAG W 2200 stärker durch den Stickstoffgasfluss beeinflusst wird als die MAG W 2800. Die Differenz dieser Werte ist auf die unterschiedlichen geometrischen Abmessungen und die daraus resultierende Saugleistung der TMPs zurückzuführen. Die Saugleistung der MAG W 2200 beträgt 2000 l/s für Stickstoff, die der MAG W 2800 2650 l/s, was einer Erhöhung von 32,5% entspricht.

Durch die größere Oberfläche und das größere Volumen des Rotors und Gehäuses der MAG W 2800, führt bei gleicher Gaslast, der Energieübertrag durch Teilchenkollisionen mit dem Stator oder Rotor zu einer geringeren Erwärmung.

Zudem ist zu beachten, dass die beiden TMPs unterschiedliche Rotorfrequenzen besitzen. Die MAG W 2800 dreht sich mit 480 Hz und die MAG W 2200 mit einer Maximalfrequenz von 490 Hz. Eine höhere Drehzahl bedeutet auch mehr Teilchenkollisionen und damit einen größeren Beitrag zur Reibung und Konvektion. Auch die Wärmestrahlung bringt bei der MAG W 2200 einen größeren Leistungsbeitrag wie bei der MAG W 2800, was sich beim Vergleich der gefitteten k_5 -Konstante ($-3,623 \cdot 10^{-9}$ zu $-2,329 \cdot 10^{-9}$) zeigt. Betrachtet man die Summe der einzelnen Leistungsbeiträge, so lässt sich erkennen, dass ein Ausgleich zwischen Erhitzung und Kühlung vorliegt und damit bei beiden Peaks die Gleichgewichtstemperatur erreicht ist.

4.2.2 Temperaturmessung mit Magnetfeld

Die Abhängigkeit der Rotortemperatur vom Magnetfeld wurde in einer Testreihe für mehrere verschiedene Feldstärken erforscht. Das Magnetfeld wurde in einem Winkel von 90° gegen die Spulenachse angelegt, da ein paralleles Magnetfeld keine Wirbelströme und damit keine Wärme erzeugt. Es wurde kein Gasfluss angelegt und wie zuvor eine Kühlwassertemperatur von $T_k=20^\circ\text{C}$ eingestellt.

4.2.2.1 MAG W 2200

Für die Magnetfeldmessungen mit der MAG W 2200 wurden vier verschiedene Feldstärken verwendet (1,0 mT; 2,0 mT; 3,0 mT; 3,6 mT). Die gemessenen Rotortemperaturen können aus Abbildung 4.17 entnommen werden.

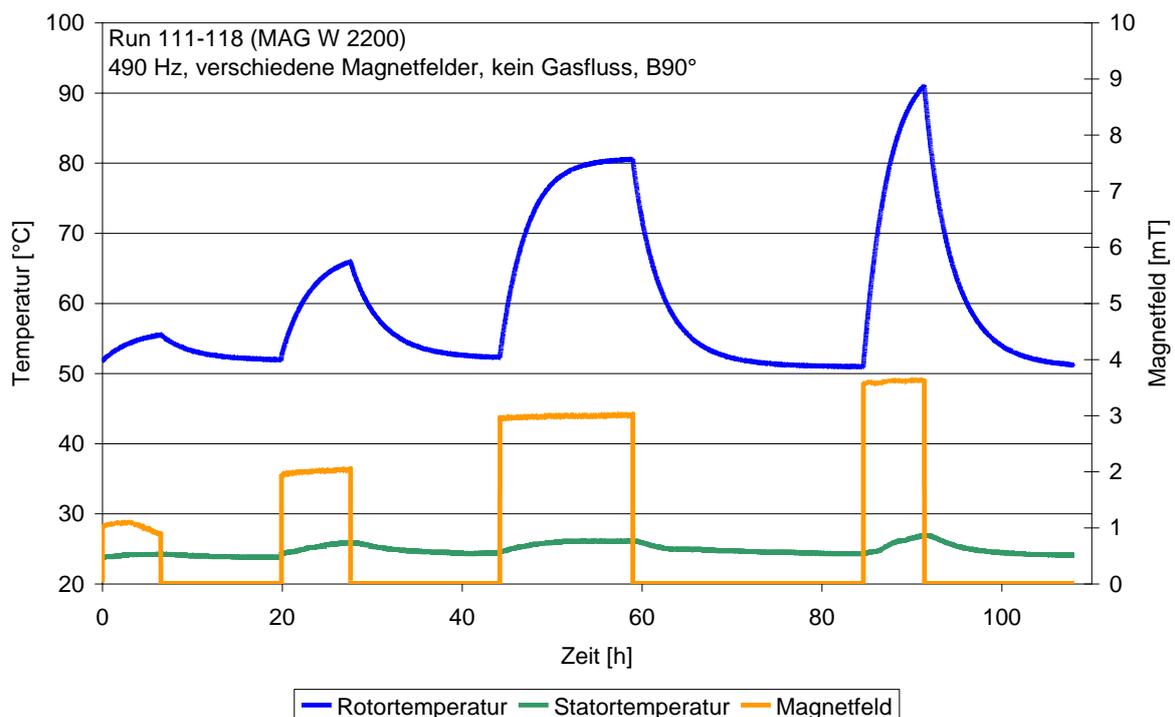


Abbildung 4.17: Rotortemperatur in Abhängigkeit von 4 verschiedenen Magnetfeldstärken

Es ist deutlich zu erkennen, dass die kritische Temperatur von 90°C für den Langzeitbetrieb bereits ab 3.6 mT überschritten war. Diese Messung wurde aus Sicherheitsgründen abgebrochen, bevor die Gleichgewichtstemperatur erreicht wurde. Dies ist auch an dem spitzen Verlauf der Kurve zu erkennen. Die Schwankungen im Magnetfeld sind auf die Stromzange zurückzuführen.

Der Vergleich mit den Gasmessungen zeigt, dass die Statortemperatur selbst bei hoher Rotortemperatur nur geringfügig ansteigt. Die Erhitzung des Gehäuses wird bei Gasfluss zum Großteil durch Konvektion und Reibung bewirkt und nur zum Teil durch die Wärmestrahlung des Rotors. Zur Berechnung der Konstanten wurden die Daten gefittet, was in folgendem Diagramm dargestellt wird.

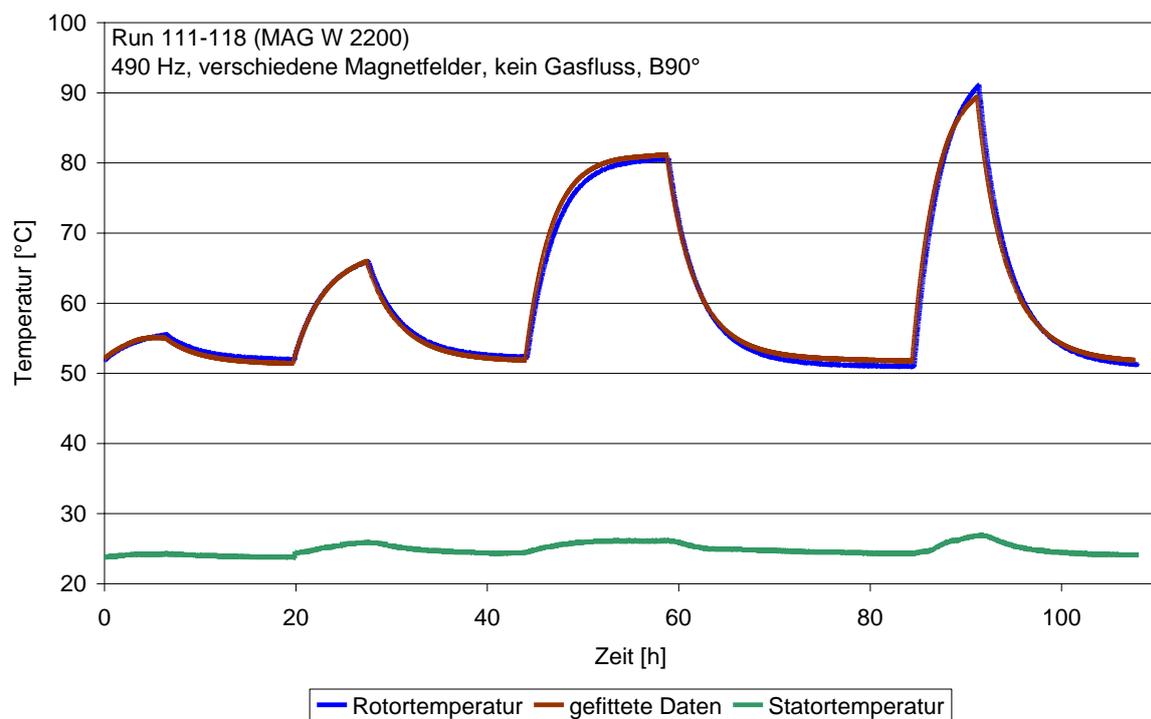


Abbildung 4.18: gefittete Rotortemperatur im Vergleich mit den Messwerten der Stickstoffgasflussmessung

Der Vergleich der Kurven veranschaulicht die fast identische Übereinstimmung der gefitteten mit den gemessenen Daten. Die Größe der Schwankungen liegt lediglich zwischen 1 °C und 2 °C. Die daraus berechneten Konstanten sind wie folgt:

Tabelle 4.7: Konstanten von Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur und wechselndem Magnetfeld, Run 111-118 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k_1 [W·K/J·mT ²]	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
k_2	k_2 [W·K/J]	7,22	$1,6 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k_3 [W·K/J·sccm]	0	0
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k_4 [W/J]	0	0
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k_5 [W/J·K ³]	$2,20 \cdot 10^{-9}$	$4,2 \cdot 10^{-12}$

Die Konstanten für eine feste Gehäusetemperatur von 25°C betragen:

Tabelle 4.8: Konstanten für Modell 1 mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ und Magnetfeld, Run 111-118 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k_1 [W·K/J·mT ²]	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
k_2	k_2 [W·K/J]	6,91	$1,5 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k_3 [W·K/J·sccm]	0	0
$-k_4 (T_r - 25^\circ\text{C}) Q$	k_4 [W/J]	0	0
$-k_5 (T_r^4 - 25^4 \text{C}^4)$	k_5 [W/J·K ³]	$2,14 \cdot 10^{-9}$	$4,0 \cdot 10^{-12}$

4.2.2.2 MAG W 2800

Analog zur Testreihe mit der MAG W 2200 erfolgte die Durchführung der Rotor-temperaturerfassung bei 4 verschiedenen Magnetfeldern (1,0 mT, 2,0 mT; 3,0 mT; 4,0 mT) mit der MAG W 2800. Dabei wurden die folgenden Rotortemperaturen gemessen:

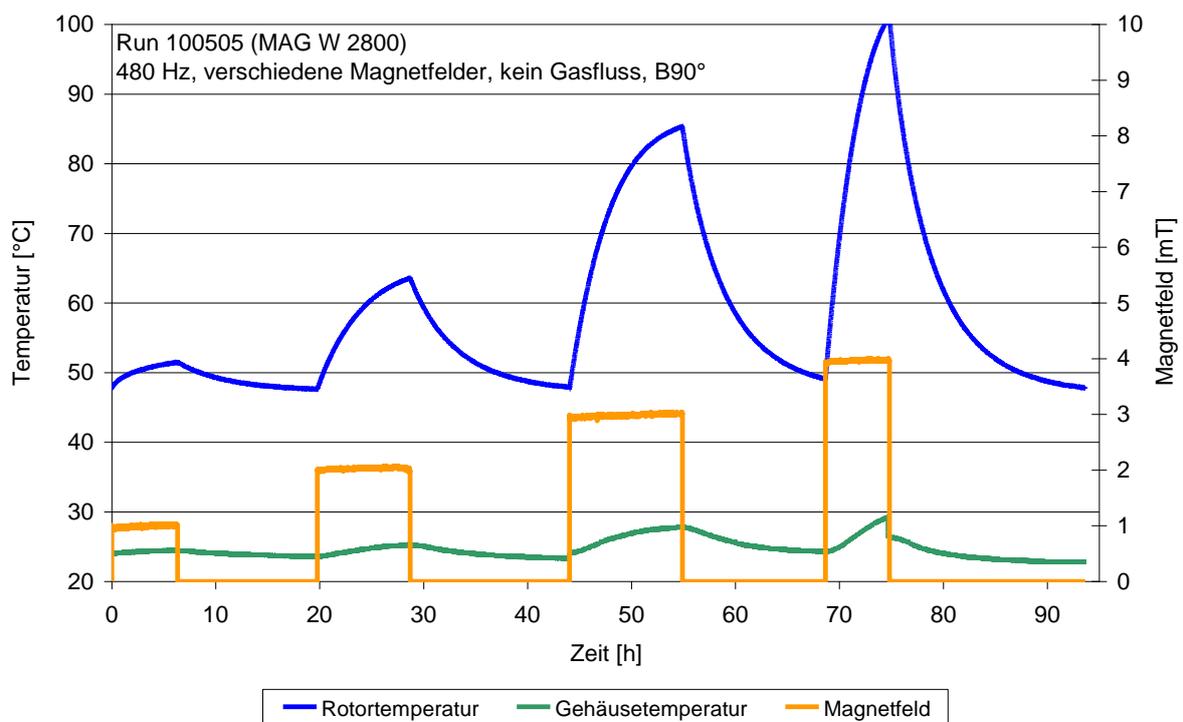


Abbildung 4.19: Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Magnetfeldern

Es zeigt sich hier ein ähnliches Bild wie bei Abbildung 4.17. Es ist lediglich eine etwas größere Erhöhung der Gehäusetemperatur bei 3 mT zu erkennen. Bei 1 mT und 2 mT sind wie zuvor kaum Erwärmungen festzustellen. Die spitzen Peaks zeigen, dass die Gleichgewichtstemperatur vor allem im letzten Run nicht erreicht

wurde. Dieser wurde aus Sicherheitsgründen abgebrochen, da bereits eine Rotortemperatur von über 100 °C erreicht worden war. Wie zuvor wurde auch diese Messung mit der Stromzange durchgeführt, was die leichten Schwankungen in den Feldwerten erklärt. Der Fit dieser Daten ergibt die folgende Abbildung:

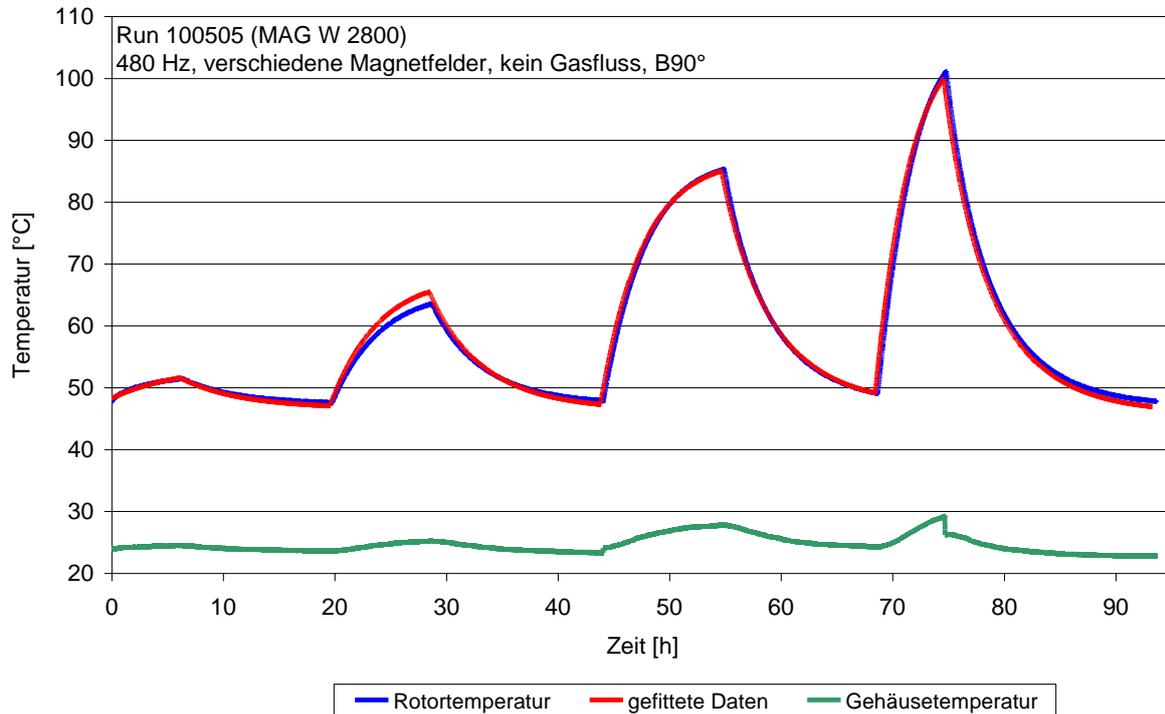


Abbildung 4.20: gefittete Rotortemperatur im Vergleich mit den Messwerten der Stickstoffgasflussmessung

Bis auf kleine Abweichungen im Bereich des zweiten Peaks deckt der Fit die gemessenen Daten gut ab. Die daraus berechneten Konstanten sind:

Tabelle 4.9: Konstanten von Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur und wechselndem Magnetfeld, Run 100505 (MAG W 2800)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·mT ²]	$1,35 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
k_2	k2 [W·K/J]	4,52	$1,3 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k3 [W·K/J·sccm]	0	0
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k4 [W/J]	0	0
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k5 [W/J·K ³]	$1,67 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-12}$

Werden die Messdaten mit einer festen Gehäusetemperatur von 25°C gefittet, so ergeben sich die folgenden Konstanten:

Tabelle 4.10: Konstanten der Temperaturmessung mit einer konstanter Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ und wechselndem Magnetfeld, Run 100505 (MAG W 2800)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k_1 [W·K/J·mT ²]	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
k_2	k_2 [W·K/J]	4,039	$1,2 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k_3 [W·K/J·sccm]	0	0
$-k_4 (T_r - 25^\circ\text{C}) Q$	k_4 [W/J]	0	0
$-k_5 (T_r^4 - 25^4 \text{C}^4)$	k_5 [W/J·K ³]	$1,57 \cdot 10^{-9}$	$-3,3 \cdot 10^{-12}$

4.2.2.3 Diskussion der Ergebnisse mit Magnetfeld

Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Messungen mit Gasfluss. Die Konstanten k_2 für die Gleichgewichtstemperatur unterscheiden sich stark. Bei Betrachtung der k_1 -Konstante lässt sich erkennen, dass beide Pumpen fast gleich auf die Erwärmung durch Wirbelströme reagieren ($1,444 \cdot 10^{-2}$ zu $1,352 \cdot 10^{-2}$), die MAG W 2200 sogar etwas mehr als die MAG W 2800. Auch für die Wärmestrahlung zeigt sich bei Vergleich der k_5 -Konstanten das gleiche Bild wie bei der Messung mit Gasfluss. Die Wärmestrahlung ist bei der MAG W 2200 wesentlich stärker wie der MAG W 2800 ($2,204 \cdot 10^{-9}$ zu $1,668 \cdot 10^{-9}$). Es lässt sich aber bei Betrachtung der Leerlaufleistung erkennen, dass die Werte für die Konstanten sich von denen der Messung mit Gasfluss unterscheiden, obwohl gleiche Versuchsbedingungen vorliegen. Daraus ergibt sich die Frage, ob es nicht mehrere Kombinationen von Konstanten gibt, die die gemessenen Daten beschreiben können. Dazu wurden in Kapitel 4.2.3.3 entsprechende Vergleiche durchgeführt.

Tabelle 4.11: Vergleich der Leistungsbeiträge bei Messungen mit Magnetfeld

Term	MAG W 2200 $T_r=63,6^\circ\text{C}$ $T_s=25,3^\circ\text{C}$ $B=2,0\text{ mT}$ Berechnete Leistung [W] / (m·c)	MAG W 2800 $T_r=65,9^\circ\text{C}$ $T_s=25,8^\circ\text{C}$ $B=2,0\text{ mT}$ Berechnete Leistung [W] / (m·c)
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	$4,94 \pm 8,1 \cdot 10^{-3}$	$4,48 \pm 7,8 \cdot 10^{-3}$
k_2	$7,22 \pm 1,6 \cdot 10^{-2}$	$4,52 \pm 1,3 \cdot 10^{-2}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	$-10,86 \pm 2,1 \cdot 10^{-2}$	$-8,73 \pm 1,8 \cdot 10^{-2}$

4.2.3 Temperaturmessung mit Gasfluss und Magnetfeld

Zur Simulation eines Gasflusses mit angelegtem Magnetfeld wurde für diese Messreihe der Gasfluss durchgängig aufrecht erhalten und lediglich das Magnetfeld an- und abgeschaltet. Bei der MAG W 2200 wurde die Messung mit zwei verschiedenen starken Stickstoffgasflüssen durchgeführt, bei der MAG W 2800 wurde dagegen nur ein Stickstoffgasfluss von 20 sccm verwendet, da für eine weitere Messreihe mit anderem Gasfluss die Zeit nicht mehr ausreichend war.

4.2.3.1 MAG W 2200

Die Daten wurden mit dauerhaftem Gasfluss von zuerst 20 sccm, dann 40 sccm aufgenommen und das Magnetfeld von 2 mT bis 4 mT variiert.

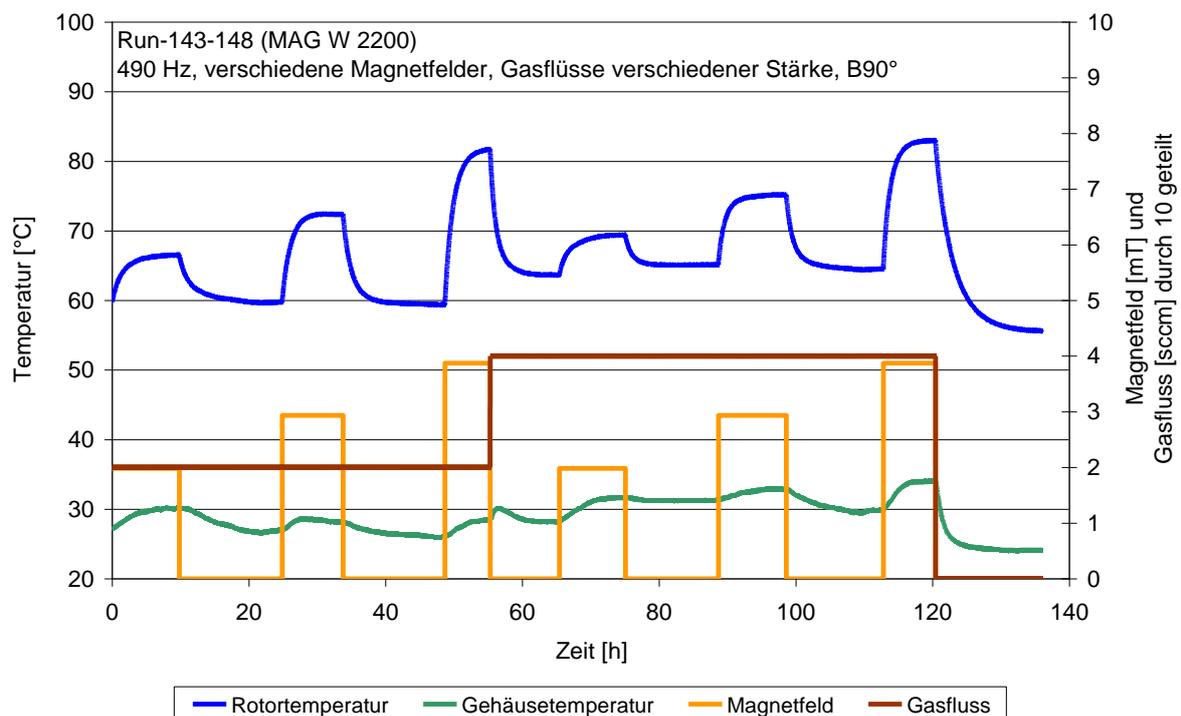


Abbildung 4.21: Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Magnetfeldstärken bei durchgängigem Stickstoffgasfluss

Der Vergleich der einzelnen Magnetfeldmessungen bei verschieden starkem Fluss zeigt, dass deutlich geringere Temperaturanstiege mit steigendem Magnetfeld auftreten. Während die Temperaturerhöhung zwischen (2 mT; 20 sccm) und (2 mT; 40 sccm) noch 2,8 °C beträgt, so ist die Differenz zwischen (4 mT; 20 sccm) und (4 mT; 40 sccm) nur noch bei 1,0 °C. Dies ist auf den zunehmenden Kühleffekt durch Konvektion aufgrund des höheren Gasflusses zurückzuführen. Mit zunehmender Gehäusetemperatur wird der Effekt geringer, dies wird durch den doppelt so großen Gasfluss ausgeglichen.

Der Fit dieser Werte mit Modell 1 ergibt das folgende Diagramm:

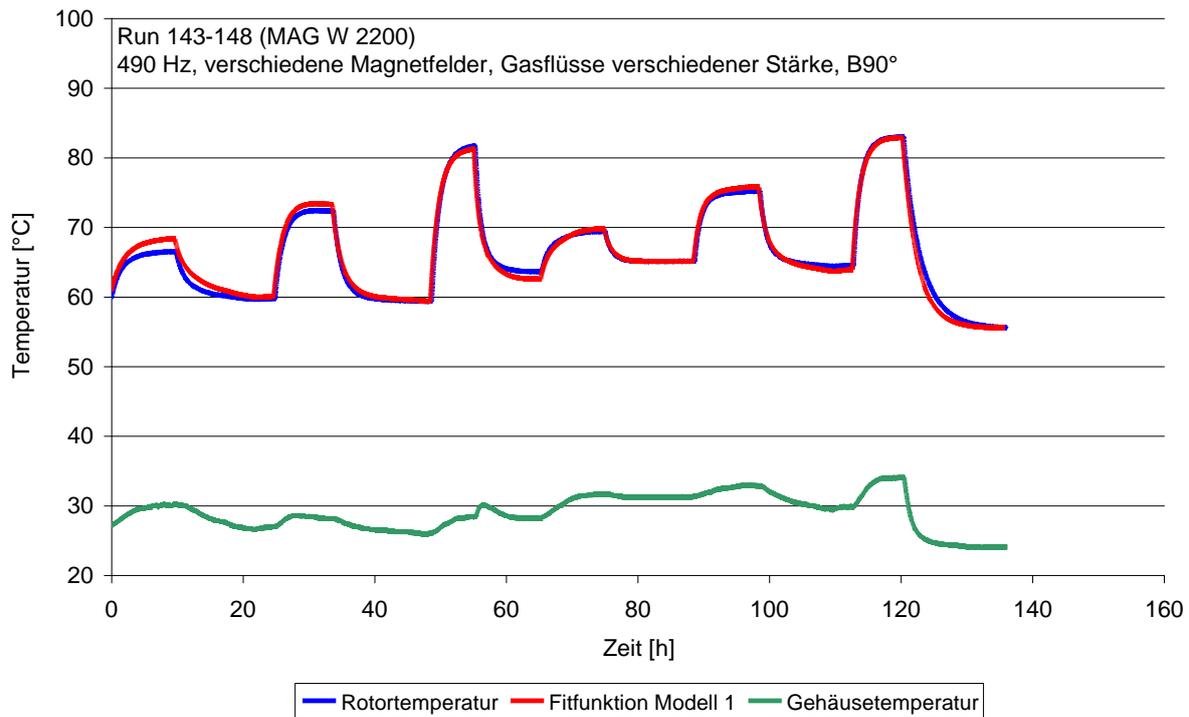


Abbildung 4.22: gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Rotortemperatur

Hier sind die Abweichungen etwas größer als bei vorangegangenen Fits. Vor allem im vorderen Bereich der Messung mit einem durchgängigen Gasfluss von 20 sccm sind Abweichungen zwischen den gefitteten und den gemessenen Daten zu erkennen, die sich jedoch nur in einem Bereich von maximal 1,5 °C bewegen. Im zweiten Abschnitt mit durchgängig 40 sccm gleichen sich die gefitteten Werte deutlich besser an die gemessenen Daten an. Die aus dem Fit resultierenden Konstanten sind:

Tabelle 4.12: Konstanten für Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur durchgängigem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run 143-148 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·mT ²]	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$
k_2	k2 [W·K/J]	$1,36 \cdot 10$	$9,3 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k3 [W·K/J·sccm]	$4,15 \cdot 10^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k4 [W/J]	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k5 [W/J·K ³]	$3,52 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-11}$

Wird nun der Fit mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$ durchgeführt, resultieren daraus die folgenden Konstanten:

Tabelle 4.13: Konstanten für Modell 1 mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$, durchgängigem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run 143-148 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k_1 [W·K/J·mT ²]	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
k_2	k_2 [W·K/J]	$1,39 \cdot 10$	$7,6 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k_3 [W·K/J·sccm]	$2,16 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - 25^\circ\text{C}) Q$	k_4 [W/J]	$2,80 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$
$-k_5 (T_r^4 - 25^4 \text{C}^4)$	k_5 [W/J·K ³]	$3,62 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-11}$

4.2.3.2 MAG W 2800

Entsprechend dem Versuch mit der MAG W 2200 wurde auch hier das Magnetfeld zwischen 1 mT und 4 mT variiert und dabei ein konstanter Stickstoffgasfluss aufrecht erhalten. Dieser betrug durchgängig 20 sccm.

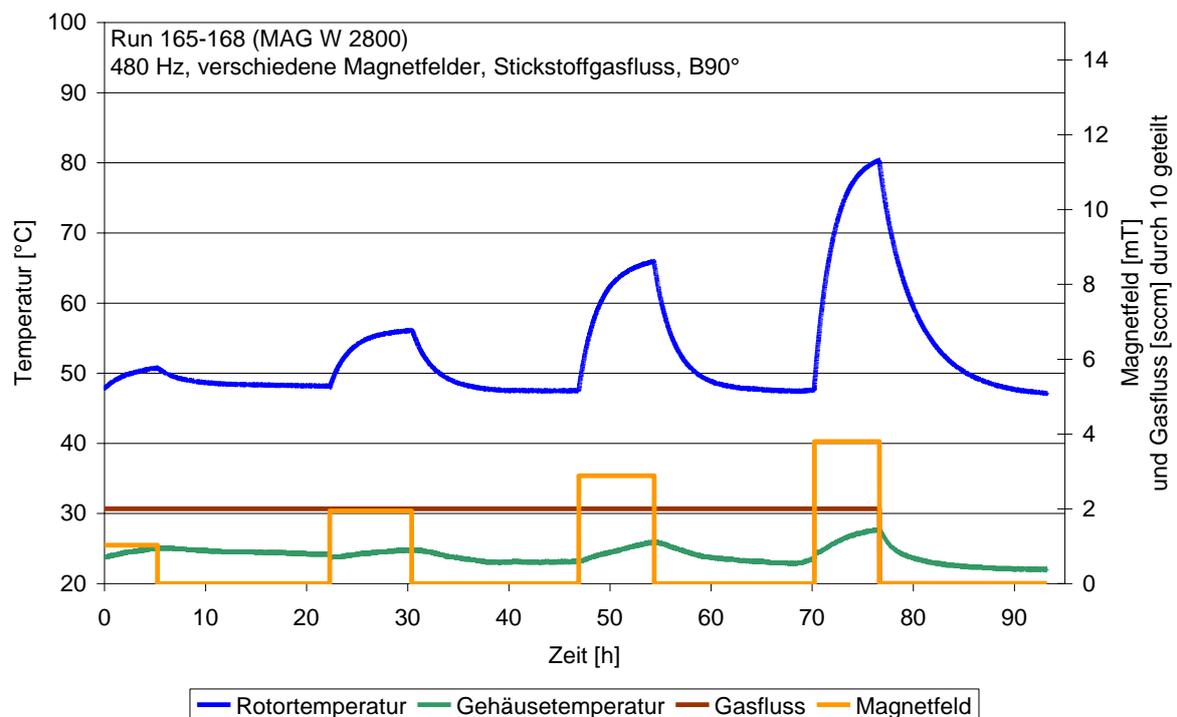


Abbildung 4.23: Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Magnetfelder bei durchgängigem Stickstoffgasfluss

Im Hinblick auf die Statortemperatur lässt sich beim Vergleich der MAG W 2800 mit der MAG W 2200 eine wesentlich geringere Erwärmung feststellen. Lediglich bei 3.9 mT erfolgt eine Erhöhung der Gehäusetemperatur auf 28°C , welche sich wie zuvor auf Konvektion und Reibung zurückführen lässt.

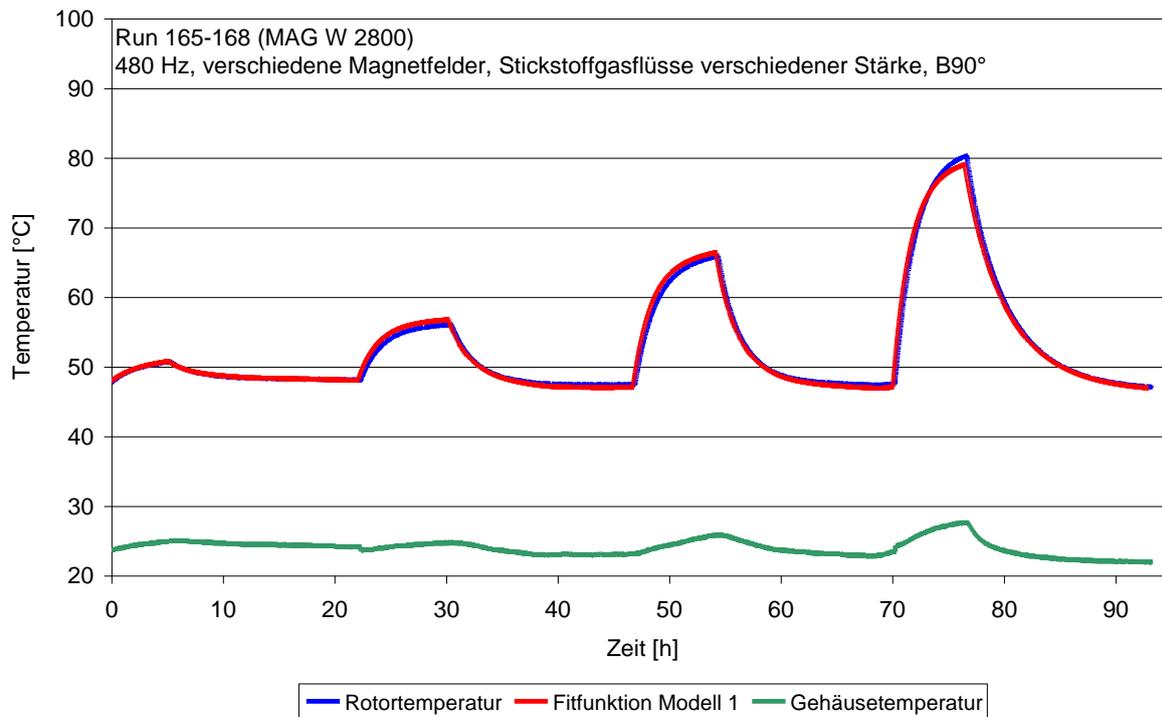


Abbildung 4.24: gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur

Die Genauigkeit des Fits ist fast durchgängig sehr gut. Lediglich am letzten Peak bei 3.9 mT zeigt sich eine Abweichung von 1,3 °C. Die berechneten Konstanten lauten:

Tabelle 4.14: Konstanten für Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur, durchgängigem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run-165-168 (MAG W 2800)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·mT ²]	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$
k_2	k2 [W·K/J]	6,15	$4,4 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k3 [W·K/J·sccm]	$3,34 \cdot 10^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k4 [W/J]	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k5 [W/J·K ³]	$2,23 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$

Erfolgt nun der Fit mit einer festen Gehäusetemperatur von 25°C folgt daraus:

Tabelle 4.15: Konstanten für Modell 1 mit einer konstanten Gehäusetemperatur von $T_s=25^\circ\text{C}$, durchgängigem Gasfluss und Magnetfeld, Run 165-168 (MAG W 2800)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·mT ²]	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$
k_2	k2 [W·K/J]	4,65	$3,4 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k3 [W·K/J·sccm]	$3,00 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - 25^\circ\text{C}) Q$	k4 [W/J]	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
$-k_5 (T_r^4 - 25^4 \text{C}^4)$	k5 [W/J·K ³]	$1,83 \cdot 10^{-9}$	$9,4 \cdot 10^{-12}$

4.2.3.3 Diskussion der Ergebnisse mit Magnetfeld und Gasfluss

Entsprechend der vorigen Messungen ist auch hier die Gleichgewichtstemperatur der MAG W 2200 wesentlich höher als die der MAG W 2800.

Tabelle 4.16: Vergleich der Leistungsbeiträge bei Messung mit Magnetfeld und Gasfluss

Term	MAG W 2200 $T_r=72,30\text{ °C}$ $T_s=28,16\text{ °C}$ $Q=20\text{ sccm}$ $B=2,88\text{ mT}$ Berechnete Leistung [W] / (m·c)	MAG W 2800 $T_r=65,89\text{ °C}$ $T_s=25,86\text{ °C}$ $Q=20\text{ sccm}$ $B=2,88\text{ mT}$ Berechnete Leistung [W] / (m·c)
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	$9,35 \pm 3,4 \cdot 10^{-2}$	$10,47 \pm 3,9 \cdot 10^{-2}$
k_2	$13,60 \pm 9,3 \cdot 10^{-2}$	$6,15 \pm 4,4 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	$8,30 \pm 1,0 \cdot 10^{-1}$	$6,68 \pm 9,3 \cdot 10^{-2}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	$-9,38 \pm 1,3 \cdot 10^{-1}$	$-10,90 \pm 1,4 \cdot 10^{-1}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	$-21,14 \pm 1,3 \cdot 10^{-1}$	$-11,66 \pm 6,3 \cdot 10^{-2}$

Bei Betrachtung der Konstanten k_1 fällt auf, dass diese bei der MAG W 2800 größer ist als die der MAG W 2200 ($1,35 \cdot 10^{-2}\text{ W/mT}^2$ zu $1,48 \cdot 10^{-2}\text{ W/mT}^2$). Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zur Messung in Kapitel 4.2.2, bei der das Magnetfeld ohne Gasfluss angelegt wurde. Auch die Konstanten der Gasreibung und Konvektion zeigen hier ein anderes Verhalten. Bei den reinen Gasmessungen waren die Konstanten für Reibung und Wärmetransport durch Gas bei der MAG W 2200 (siehe Tabelle 4.7) um ein Vielfaches größer als bei der MAG W 2800. Vergleicht man jedoch Tabelle 4.12 und Tabelle 4.14, so ist zu erkennen, dass beide TMPs fast identische Werte aufweisen. Der Vergleich mehrerer Fits mit unterschiedlicher Anzahl an Daten hat deutlich gemacht, dass der Wert der Konstanten maßgeblich davon abhängt, wie umfangreich die Messreihe angesetzt wird. Wird z.B. bei Run 148 nur der mit 20 sccm durchgeführte Teil verwendet, liefert der Fit folgenden Konstanten:

Tabelle 4.17: Konstanten aus Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur, durchgängigem Gasfluss von 20 sccm und wechselndem Magnetfeld, Run 148 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k_1 [W·K/J·mT ²]	$1,64 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$
k_2	k_2 [W·K/J]	$2,16 \cdot 10^1$	$4,9 \cdot 10^{-1}$
$k_3 Q$	k_3 [W·K/J·sccm]	$1,39 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k_4 [W/J]	$-2,04 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k_5 [W/J·K ³]	$-5,89 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$

Der direkte Vergleich von Tabelle 4.17 mit Tabelle 4.12 zeigt starke Abweichungen zwischen den Konstanten. Werden diese für die Berechnung der Temperatur verwendet, ergibt sich jedoch ein fast identisches Ergebnis. Daraus lässt sich schließen, dass die einzelnen Parameter stark untereinander korreliert sind.

4.2.3.4 Veranschaulichung von Modell 2

Wie in Kapitel 2.7 beschrieben, weist das zweite Modell durch die direkte Abhängigkeit des Motorstroms teils starke Schwankungen auf, ist aber sehr nützlich, wenn das angelegte Magnetfeld nicht bekannt ist. Dies soll durch die folgende Abbildung veranschaulicht werden:

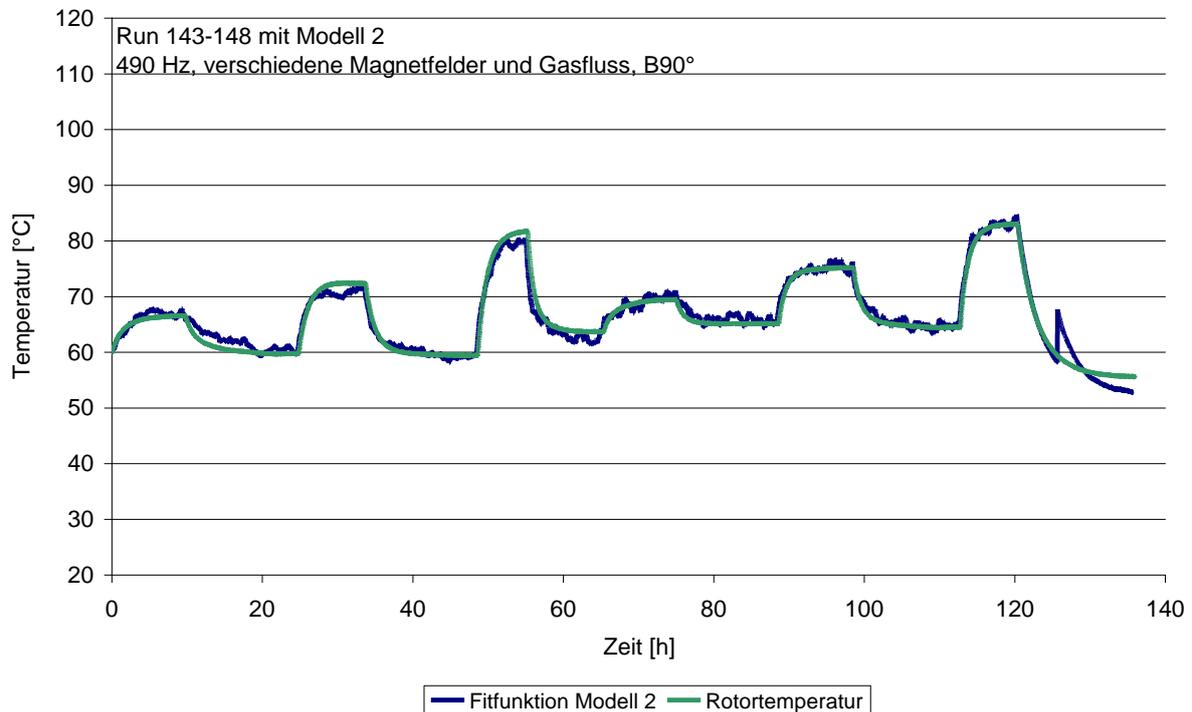


Abbildung 4.25: mit Modell 2 gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur

Der Vergleich der gefitteten Werte mit den gemessenen demonstriert das Problem der Schwankungen. Die Daten passen grundsätzlich gut aufeinander, die Abweichungen führen jedoch zu einer Verringerung der Genauigkeit. Zu Vergleichszwecken nachfolgend eine Tabelle mit den daraus resultierenden Konstanten:

Tabelle 4.18: Konstanten aus Modell 2 mit gemessener Gehäusetemperatur, durchgängigem Gasfluss von 20 sccm und wechselndem Magnetfeld, Run 148 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 I^2 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·A ²]	3,62	$5,5 \cdot 10^{-2}$
k_2	k2 [W·K/J]	9,18	$5,4 \cdot 10^{-2}$
$k_3 I$	k3 [W·K/J·A]	4,23	$2,1 \cdot 10^{-2}$
$-k_4 (T_r - 25^\circ\text{C}) Q$	k4 [W/J]	$3,01 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
$-k_5 (T_r^4 - 25^4 \text{C}^4)$	k5 [W/J·K ³]	$2,72 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$

Der gleiche Fit wurde noch für Run 165-168 (MAG W 2800) durchgeführt.

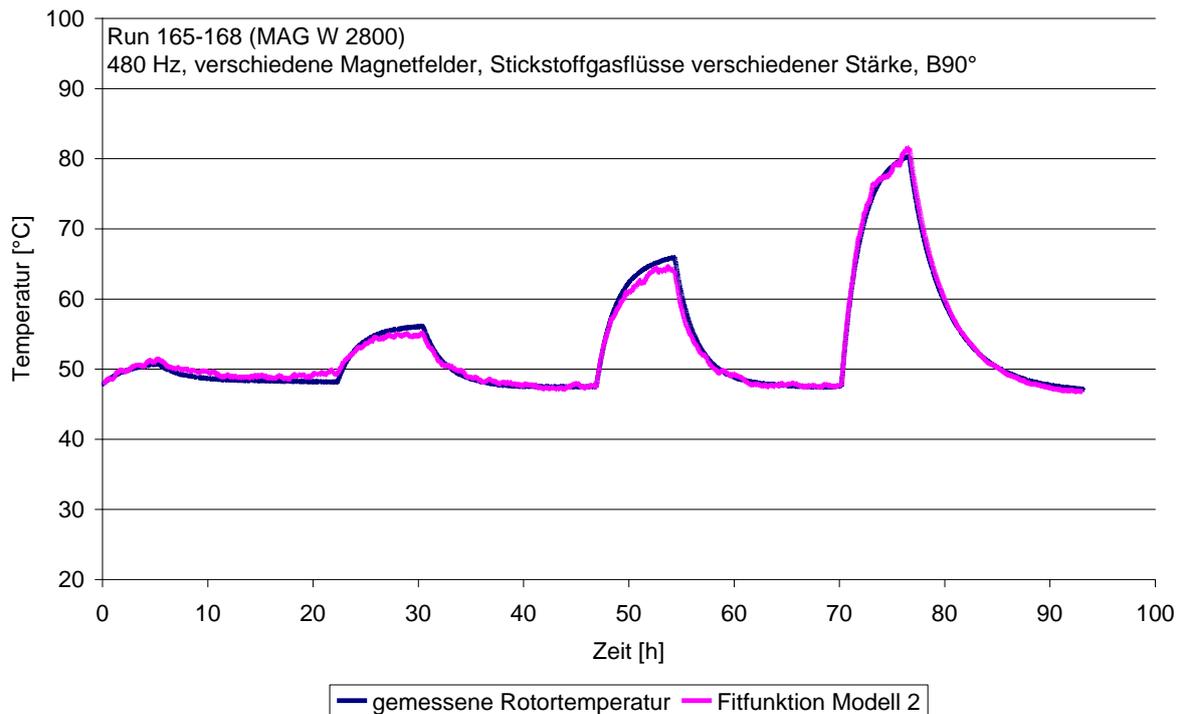


Abbildung 4.26: mit Modell 2 gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur

Im Vergleich zu Abbildung 4.25 zeigt sich das gleiche Verhalten. Die grundsätzliche Tendenz stimmt, aber aufgrund der Schwankungen der Rotortemperatur decken die gefitteten Daten die gemessenen nicht so gut ab wie bei Modell 1. Die aus Abbildung 4.26 folgenden Konstanten sind:

Tabelle 4.19: Konstanten aus Modell 2 mit gemessener Gehäusetemperatur, durchgängigem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run 168 (MAG W 2800)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 I^2 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·A ²]	1,55	$1,1 \cdot 10^{-1}$
k_2	k2 [W·K/J]	11,43	$2,8 \cdot 10^{-1}$
$k_3 I$	k3 [W·K/J·A]	5,17	$8,7 \cdot 10^{-2}$
$-k_4 (T_r - 25^\circ\text{C}) Q$	k4 [W/J]	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
$-k_5 (T_r^4 - 25^4 \text{°C}^4)$	k5 [W/J·K ³]	$2,28 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$

4.2.4 Gesamtüberblick über die Daten

Wie zuvor beschrieben erhöht sich die Genauigkeit der korrelieren Konstanten, wenn mehr Messwerte verwendet werden. Daher Nachfolgend ein Fit über die kombinierten Daten der Magnetfelds-Runs und der Magnetfeld/Gasfluss-Runs für die MAG W 2200 und die MAG W 2800. Die Gasfluss-Runs wurden nicht berücksichtigt, da deren Gehäuse- und Rotortemperatur nicht zu den anderen Messungen passt und daher der Fit nicht brauchbar war. Für die Mag W 2200 folgt daraus:

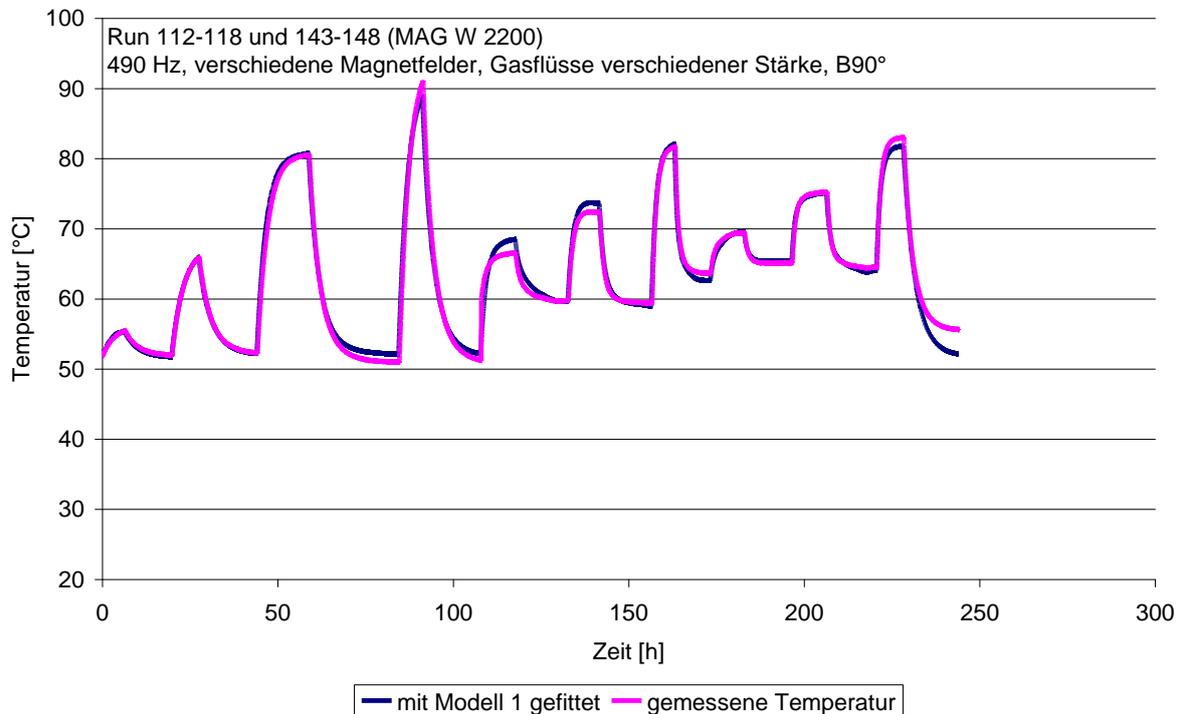


Abbildung 4.27: gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur

Der Fit zeigt wohl leichte Abweichungen, ist im Großen und Ganzen aber gut deckend. Ein Teil der Abweichungen resultiert aus den zusammengesetzten Messungen. Am Übergang der Messungen herrschen unterschiedliche Gehäuse- und Rotortemperaturen resultierend aus der nicht konstanten Zimmertemperatur. Daraus ergeben sich Abweichungen im Fit. Die daraus resultierenden Konstanten sind:

Tabelle 4.20: Konstanten aus Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur, verschiedenem Gasfluss und wechselndem Magnetfeld, Run 112-118 und 143-148 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k_1 [W·K/J·mT ²]	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
k_2	k_2 [W·K/J]	7,68	$1,6 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k_3 [W·K/J·sccm]	$7,48 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k_4 [W/J]	$1,99 \cdot 10^{-4}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k_5 [W/J·K ³]	$2,29 \cdot 10^{-9}$	$4,1 \cdot 10^{-12}$

Ein Vergleich mit den Konstanten aus den anderen Messungen zeigt bereits bei zwei gekoppelten Messungen, dass der statistische Fehler der Konstanten wesentlich kleiner ist wie zuvor. Nachfolgend die Konstanten für eine konstante Gehäusetemperatur von 25°C:

Tabelle 4.21: Konstanten aus Modell 1 mit konstanter Gehäusetemperatur von $T_k=25^\circ\text{C}$, verschiedenem und wechselndem Magnetfeld, Run 112-118 und 143-148 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·mT ²]	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
k_2	k2 [W·K/J]	7,04	$1,4 \cdot 10^{-2}$
$k_3 Q$	k3 [W·K/J·sccm]	$6,54 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k4 [W/J]	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k5 [W/J·K ³]	$2,14 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-12}$

Zusätzlich noch der Fit und die Konstanten der Runs 100505 und 165-168 der MAG W 2800.

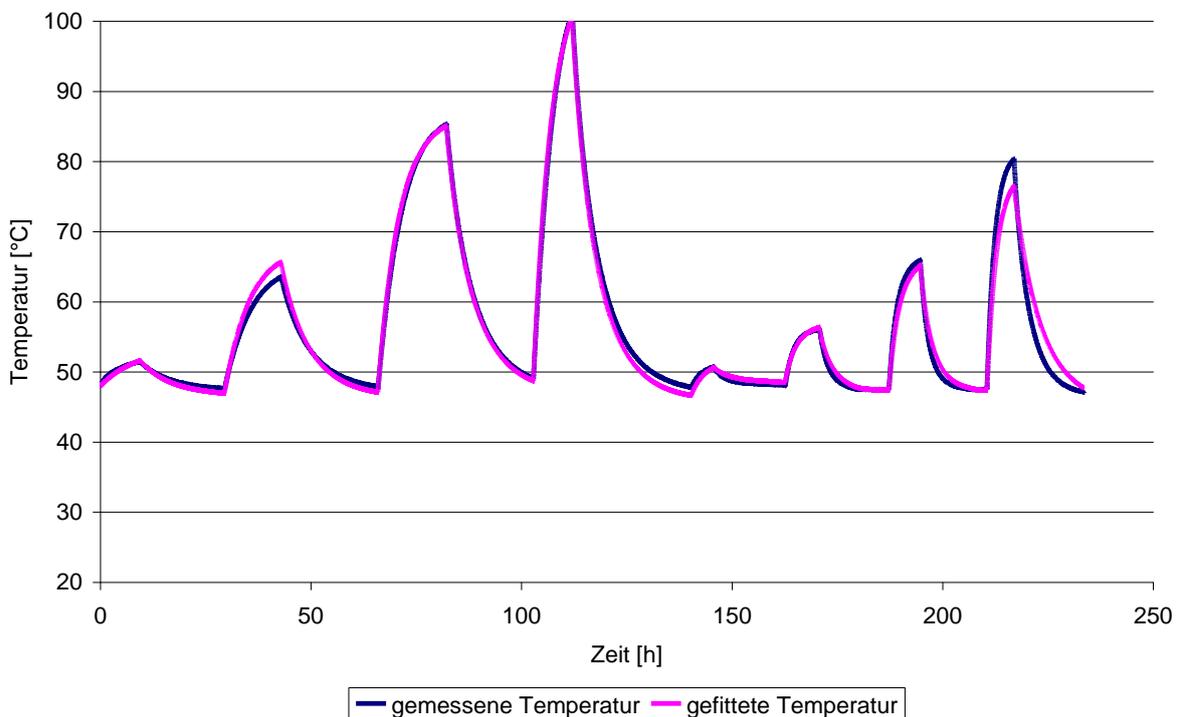


Abbildung 4.28: gefittete Rotortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur im Vergleich mit der gemessenen Gehäusetemperatur

Auch hier zeigt sich wieder eine gute Übereinstimmung der gefitteten mit den gemessenen Daten.

Die daraus folgenden Konstanten sind:

Tabelle 4.22: Konstanten aus Modell 1 mit gemessener Gehäusetemperatur, verschiedenem und wechselndem Magnetfeld, Run 100505 und 165-168 (MAG W 2800)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·mT ²]	$1,46 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
k_2	k2 [W·K/J]	4,93	$8,2 \cdot 10^{-3}$
$k_3 Q$	k3 [W·K/J·sccm]	$4,93 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k4 [W/J]	$1,97 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-5}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k5 [W/J·K ³]	$1,82 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-12}$

Auch hier zeigt sich, wie zuvor, eine starke Verbesserung des statistischen Fehlers. Damit bestätigt sich die im vorigen Kapitel getroffene Aussage, dass die Genauigkeit der Konstanten maßgeblich von der Anzahl der verwendeten Daten abhängt. Für eine konstante Gehäusetemperatur von 25 °C ergeben sich folgende Konstanten:

Tabelle 4.23: Konstanten aus Modell 1 mit konstanter Gehäusetemperatur von $T_r=25^\circ\text{C}$, verschiedenem und wechselndem Magnetfeld, Run 100505 und 165-168 (MAG W 2800)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 \cdot 100 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W·K/J·mT ²]	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
k_2	k2 [W·K/J]	4,35	$7,2 \cdot 10^{-3}$
$k_3 Q$	k3 [W·K/J·sccm]	$4,31 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k4 [W/J]	$1,79 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k5 [W/J·K ³]	$1,70 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-12}$

Aus den berechneten Daten erfolgt nun über die folgenden Abbildungen für die MAG W 2200 und die MAG W 2800 die Temperaturvorhersage für verschiedene Magnetfelder und Gasflüsse. Für das Erstellen dieser Diagramme wurde eine Gehäusetemperatur von 25 °C verwendet.

In Abbildung 4.29 ist die Rotortemperatur in Abhängigkeit von Magnetfeld und Gasfluss zu finden.

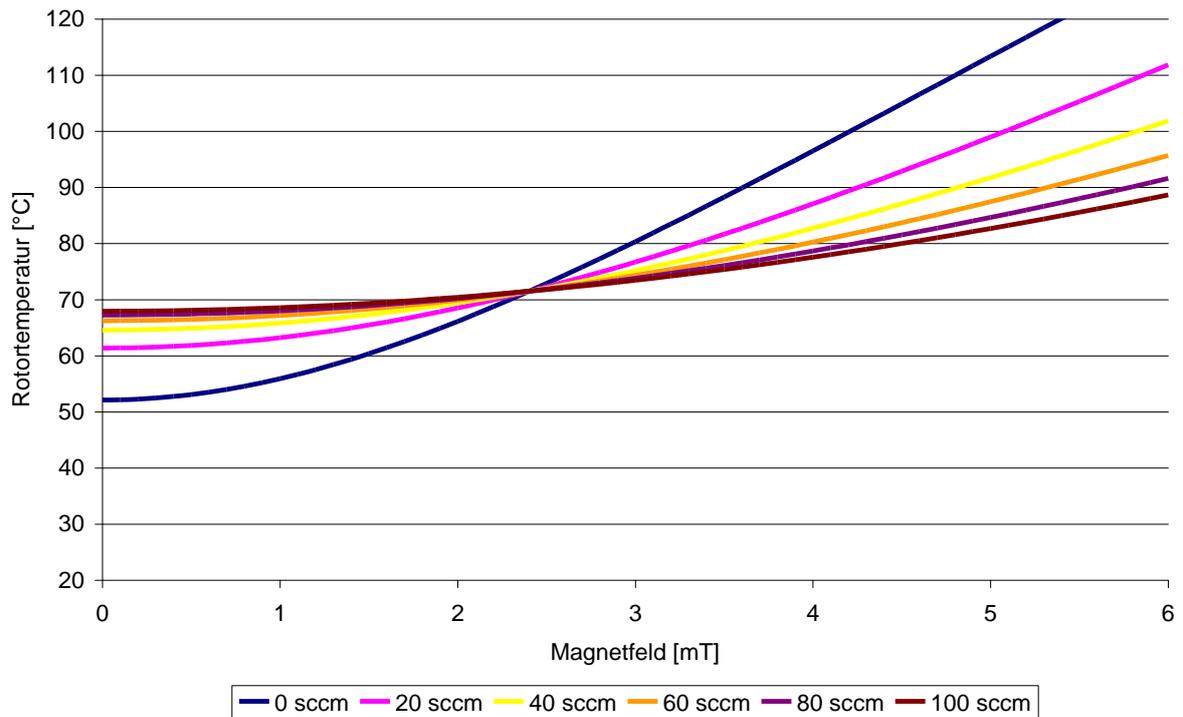


Abbildung 4.29: Rotortemperatur in Abhängigkeit von Magnetfeld und Gasfluss (MAG W 2200)

Wie zuvor für die MAG W 2200, nachfolgend das Diagramm für die MAG W 2800.

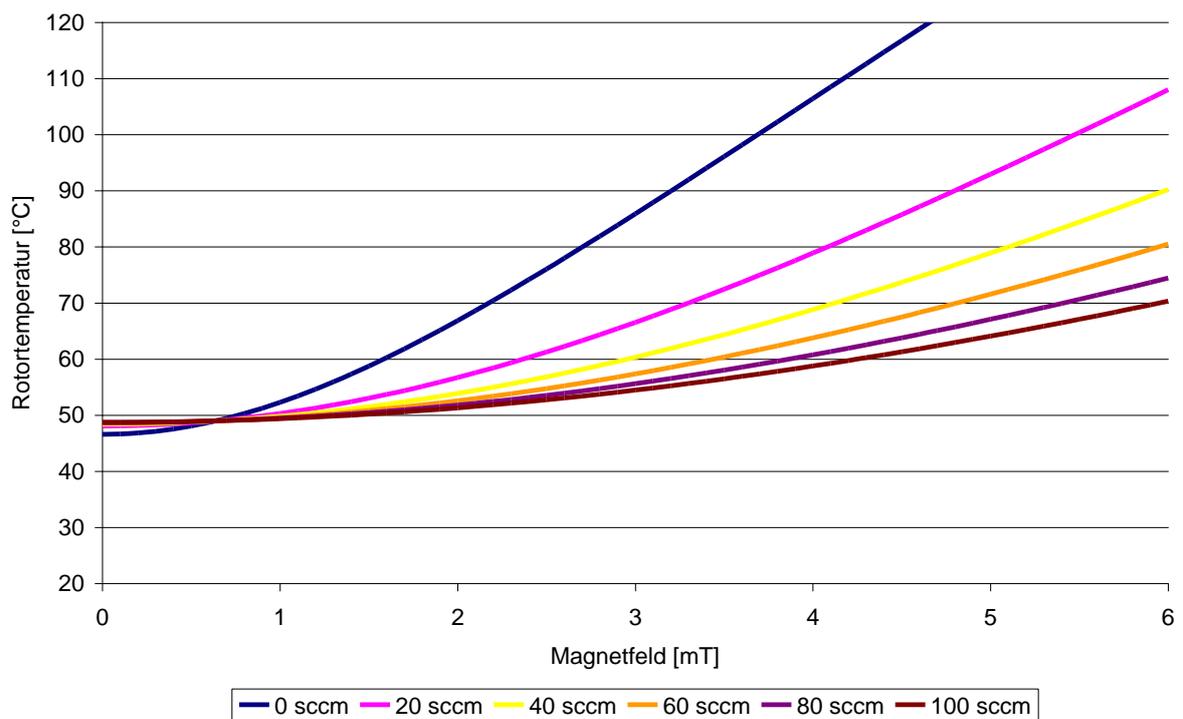


Abbildung 4.30: Rotortemperatur in Abhängigkeit von Magnetfeld und Gasfluss (MAG W 2800)

4.3 Temperaturmessung mit Magnetfeld und verschiedenen Kühlwassertemperaturen mit der MAG W 2200

Um den Einfluss der Kühlwassertemperatur auf die Motor- und Rotortemperatur untersuchen zu können, wurden mehrere Messungen mit verschiedenen Kühlwassertemperaturen und angelegtem Magnetfeld durchgeführt. Die Ergebnisse dazu finden sich in Abbildung 4.31 und Tabelle 4.24 wieder.

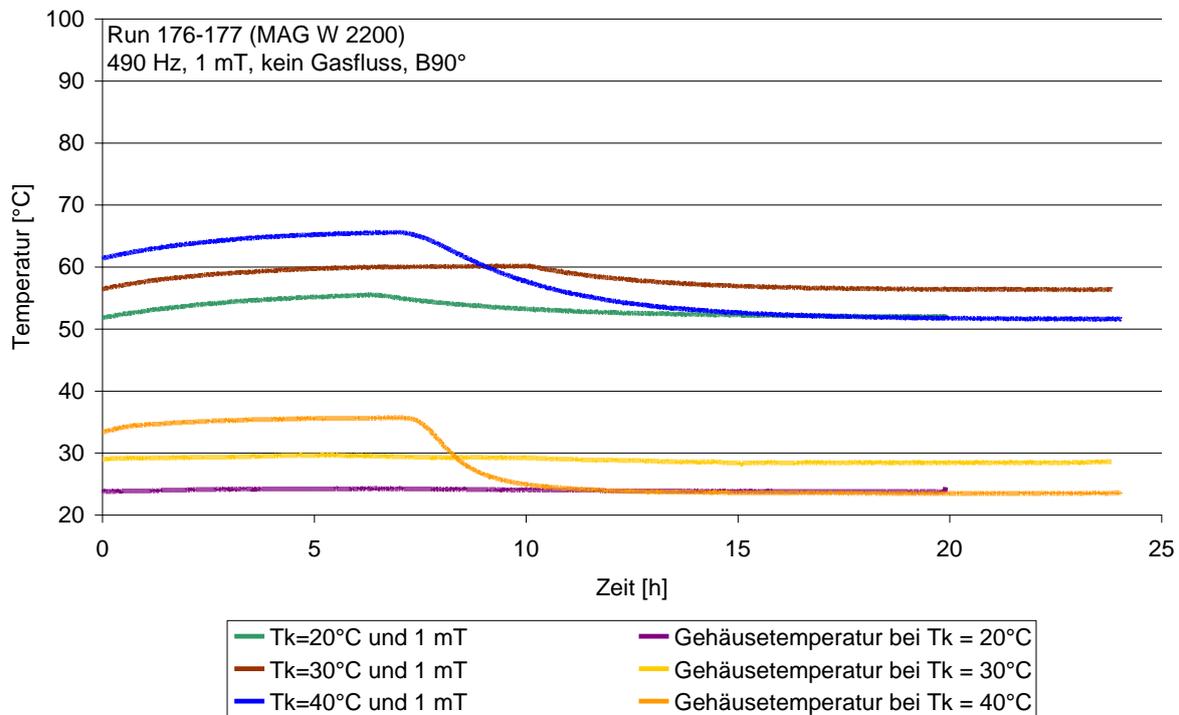


Abbildung 4.31: Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Kühlwassertemperaturen T_k und einem Magnetfeld von 1 mT

Der Vergleich der Rotortemperaturen aus Abbildung 4.31 zeigt einen durchschnittlichen Temperaturanstieg von 5°C bei einer Erhöhung der Kühlwassertemperatur um 10°C. Das starke Abfallen der $T_k=40^\circ\text{C}$ -Kurve gegen Ende rührt von der Wiederherstellung der Kühlwasserausgangstemperatur von 20°C her. Um den Einfluss der Kühlwasser- und Motortemperatur auf die Rotortemperatur genauer erkennen zu können, wurden die Werte in Tabelle 4.24 zusammengefasst.

Tabelle 4.24: Temperaturvergleich bei verschiedenen Kühlwassertemp. und $B=1\text{ mT}$ (MAG W 2200)

Run	Kühlwassertemp. [°C]	Motortemp. [°C]	Lagertemp. [°C]	Rotortemp. [°C]
111	20,0	51	39	55,6
176	30,0	60	49	60,0
177	40,0	70	58	65,6

Es zeigt sich, dass die Motor- und Lagertemperatur der Erhöhung der Kühlwassertemperatur folgen. Es besteht somit ein linearer Zusammenhang zwischen der Motor- bzw. Lagertemperatur mit der Kühlwassertemperatur. Im Vergleich dazu steigt die Rotortemperatur nur etwa halb so stark an. Die Motortemperatur hat somit einen starken Einfluss auf die Rotortemperatur infolge thermischer Strahlung. Jedoch zeigt die Messung auch, dass ein Teil der Rotorwärme über Wärmestrahlung an den Stator und die deutlich kältere Gehäusewand abgegeben wird.

Das Einbeziehen der Wärmestrahlung zwischen Rotor und Motor würde sich lediglich für den „monitoring“-Betrieb anbieten, da bei Simulationen oder Design-Studien mit der Motortemperatur eine weitere Konstante abgeschätzt werden muss und somit die Genauigkeit weiter verringert wird.

Unter der Voraussetzung, dass die Motortemperatur bekannt ist, wurde die Formel von Modell 1 um einen Term erweitert, der die Wärmestrahlung zwischen Rotor und Motor berücksichtigt.

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{k_1 B^2}{1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15)} + k_2 + k_3 Q - k_4 (T_r - T_s) Q - k_5 (T_r^4 - T_s^4) - k_6 (T_r^4 - T_m^4) \quad (4.2)$$

Das Fitten von Run 148 (MAG W 2200) mit dieser erweiterten Formel ergab folgende Konstanten:

Tabelle 4.25: Konstanten der Temperaturmessung unter Einbeziehung der Motortemperatur mit gemessener Gehäusetemperatur, durchgängigem Gasfluss von 20 sccm und wechselndem Magnetfeld, Run 148 (MAG W 2200)

Term	Konstante	Wert	Statistischer Fehler
$k_1 B^2 / (1 + 3,9 \cdot 10^{-3} (T_r - 293,15))$	k1 [W/A ²]	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$
k_2	k2 [ohne]	$1,66 \cdot 10$	$1,3 \cdot 10^{-1}$
$k_3 Q$	k3 [W/A]	$5,29 \cdot 10^{-1}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
$-k_4 (T_r - T_s) Q$	k4 [W/K]	$-1,29 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
$-k_5 (T_r^4 - T_s^4)$	k5 [W/K ⁴]	$-4,44 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-11}$
$-k_6 (T_m^4 - T_s^4)$	k6 [W/K ⁴]	$1,22 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-11}$

Das Vorzeichen der Konstanten des Motorstroms ist in diesem Fall positiv, da der Motor zu Beginn wärmer ist als der Rotor und daher zur Erwärmung beiträgt. Für den späteren Fall ist dies allerdings nicht mehr richtig, da der Rotor eine höhere Temperatur aufweist als der Motor. Daher ist es problematisch die Motortemperatur in den Fit mit einzubeziehen. Die Größe der Konstante k_6 lässt auf einen geringen Einfluss der Motor- auf die Rotortemperatur schließen. Dies steht allerdings im Gegensatz zu den Ergebnissen aus Tabelle 4.24. Da die Konstanten aber stark miteinander korrelieren ist der genaue Wert der Konstanten k_6 schwer festzustellen. Für kommende Messungen sollten daher speziell beim Fall von Magnetfeld und Gasfluss Vergleichsmessungen mit verschiedenen Kühlwassertemperaturen durchgeführt werden.

4.4 Temperaturmessung mit Magnetfeld und Abschirmung mit der MAG W 2800

Um eine zu starke Erwärmung bzw. eine Beeinträchtigung der Stabilität des Rotors zu verhindern, wurde eine Abschirmung für die MAG W 2800 konstruiert. Diese besteht aus 2 mm dickem ST37 Stahl, welcher zum Korrosionsschutz noch mit spezieller Farbe lackiert wurde. Die Höhe und der Radius dieser Abschirmung betragen 400 mm, die Permeabilität ca. 2000.

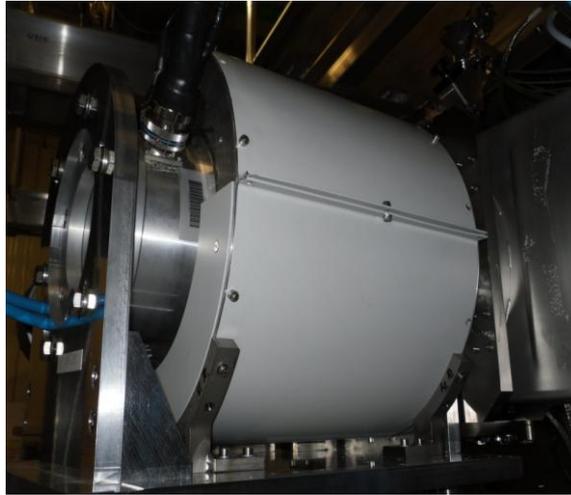


Abbildung 4.32: ST37-Abschirmung montiert an einer TMP an einem Pumpport der DPS2-F

Zur Überprüfung der Auswirkungen dieser Abschirmung auf die TMP wurde die Rotortemperatur mit und ohne Abschirmung gemessen. Nachfolgend ein kurzer Überblick über die gewonnenen Daten.

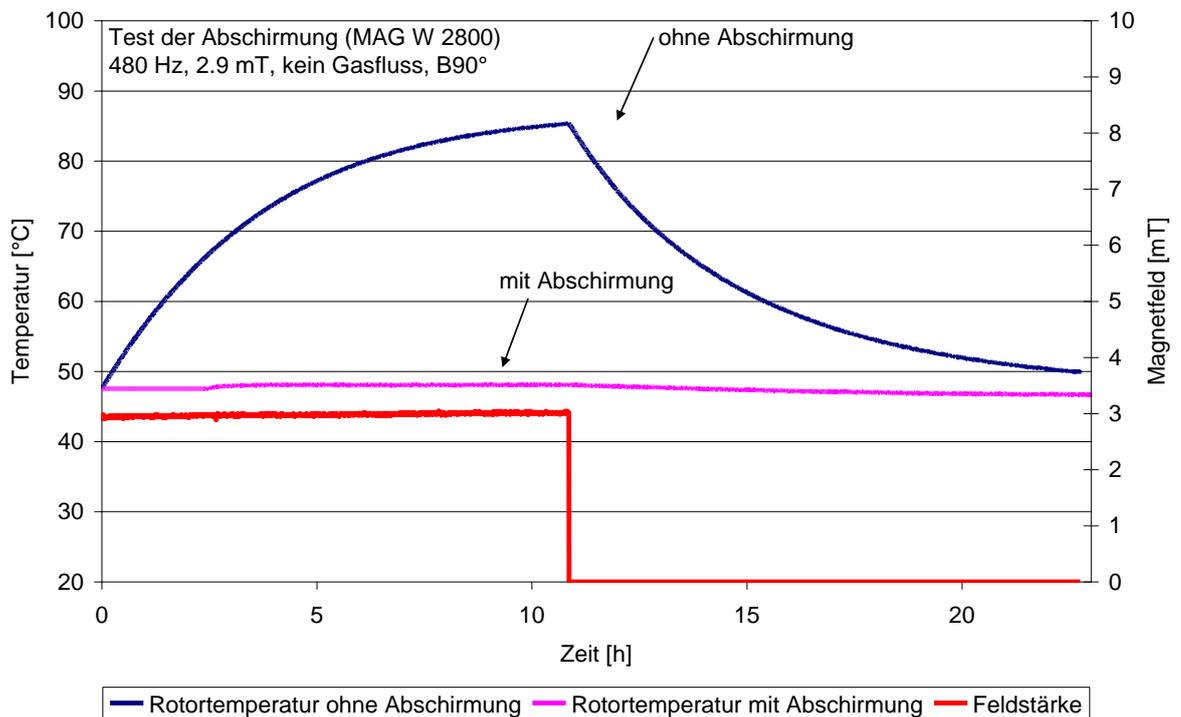


Abbildung 4.33: Vergleich der Rotortemperatur einer Messung mit und ohne Abschirmung

Das Anlegen eines Magnetfelds von 2,9 mT bewirkt bei vorhandener Abschirmung lediglich eine Erhöhung der Temperatur von knapp 0,75 °C, im Vergleich dazu erhöht sich die Temperatur ohne Abschirmung um 37 °C. Daraus lässt sich schließen, dass die Abschirmung fast das komplette Magnetfeld umleitet. Nur ein kleiner Teil der Feldlinien hat die Möglichkeit die Abschirmung zu durchdringen und damit eine Erwärmung herbeizuführen. Um das Verhalten der Rotortemperatur mit Abschirmung auch bei stärkeren Feldern zu untersuchen wurde die Feldstärke noch bis 8 mT erhöht. Die Ergebnisse dazu finden sich in Abbildung 4.34 wieder.

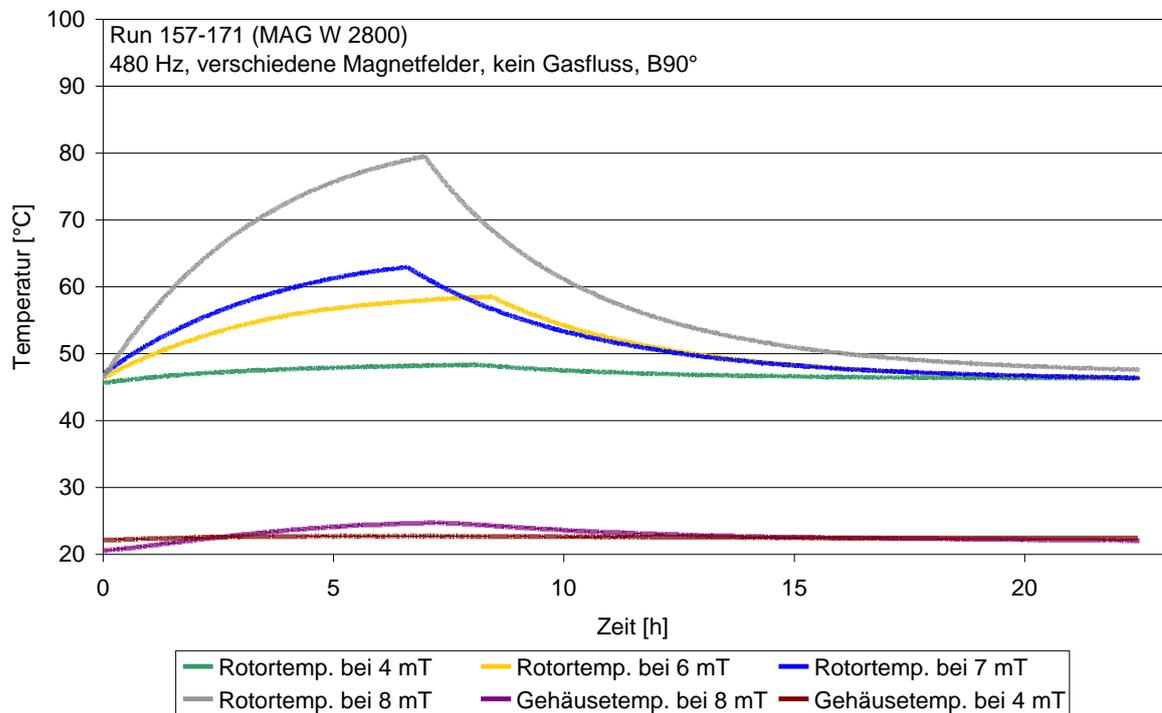


Abbildung 4.34: Rotortemperatur in Abhängigkeit verschiedener Magnetfelder mit Abschirmung

Die Erhöhung des Magnetfeldes auf 4 mT, zeigte eine erste deutlich sichtbare Rotortemperaturerhöhung. Diese liegt im Bereich von 3 °C zeigt aber, dass die Anzahl der die Abschirmung durchdringenden Feldlinien zugenommen hat. Wird das Magnetfeld weiter erhöht, kommt es zur Sättigung der Abschirmung. Durch die Sättigung werden keine weiteren Feldlinien umgeleitet und die Rotortemperatur verhält sich wie wenn keine Abschirmung vorhanden wäre (siehe Abbildung 4.34). Aus Vergleich der Werte aus Tabelle 4.26 lässt sich schließen, dass ca. 4 mT bis 5 mT durch die Abschirmung umgeleitet werden.

Tabelle 4.26: Vergleich der Temperaturen mit und ohne Abschirmung (MAG W 2800)

ohne Abschirmung		mit Abschirmung	
Magnetfeld [mT]	Rotortemp. [°C]	Magnetfeld [mT]	Rotortemp. [°C]
1	51,52	4	48,35
2	63,58	6	58,54
3	85,38	7	62,98
4	101,18	8	79,51

Allerdings war bei diesen Messungen die Endtemperatur noch nicht erreicht. Ein Fit der Rotortemperatur mit Abschirmung ist leider nicht möglich, da das Verhalten der Sättigung nicht im Modell mit einbezogen werden kann.

4.5 Messungen mit gepulstem Magnetfeld mit der MAG W 2200

Da TMPs bei JET hohen, gepulsten Magnetfeldern ausgesetzt werden, sind fundierte Kenntnisse über das Verhalten der Rotortemperatur und der Lagerstabilität erforderlich. Daher wurde durch manuelles An- und Abschalten des Magnetfeldes der gepulste Betrieb simuliert. Die maximale Stärke des verwendeten Magnetfeldes liegt bei 8,5 mT, da die TMP bei höheren Feldern die Rotorfrequenz reduzierte und auch nach Abschalten des Feldes nicht wieder auf Maximalfrequenz beschleunigen konnte. Für größere Felder wird daher eine Abschirmung benötigt. Die nachfolgenden Diagramme zeigen einen Vergleich der gemessenen Rotortemperaturen mit den berechneten. Für die berechneten Rotortemperaturen wurden Konstanten aus Tabelle 4.12 und Tabelle 4.13 verwendet. Damit ist es möglich, die Werte bei einer festen Gehäusetemperatur von 25°C mit denen der gemessenen Gehäusetemperatur zu vergleichen.

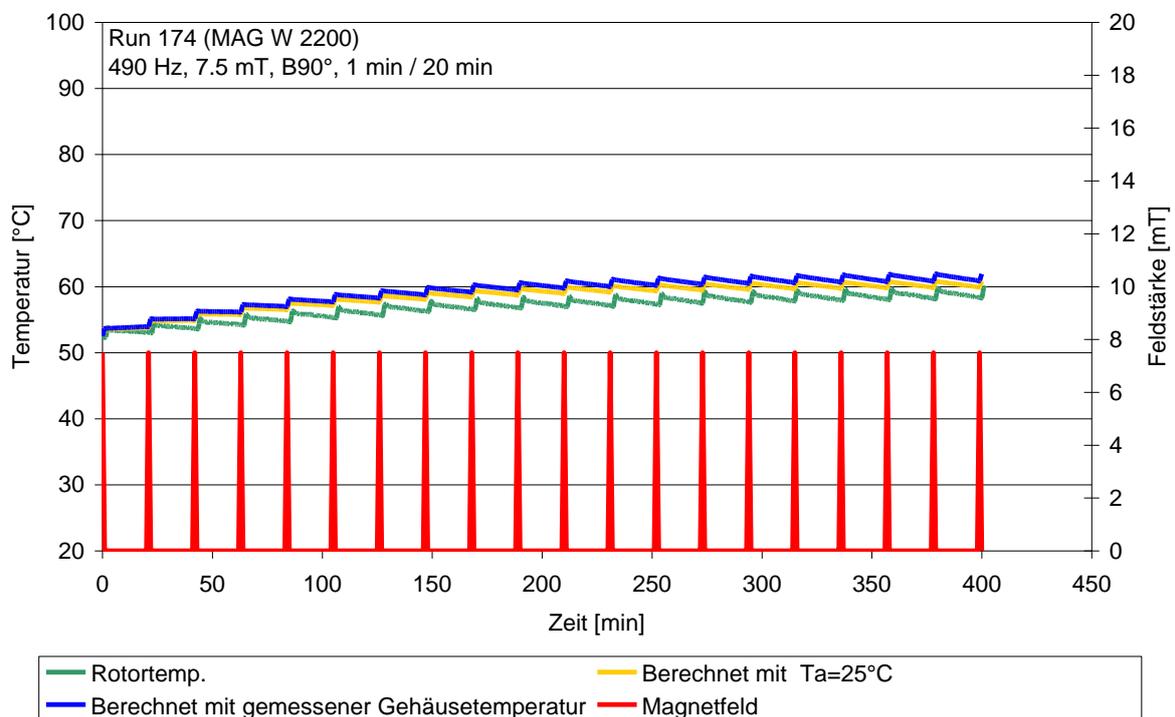


Abbildung 4.35: Rotortemperatur bei einer Pulsung von 1 min (Feld an) zu 20 min (Feld aus)

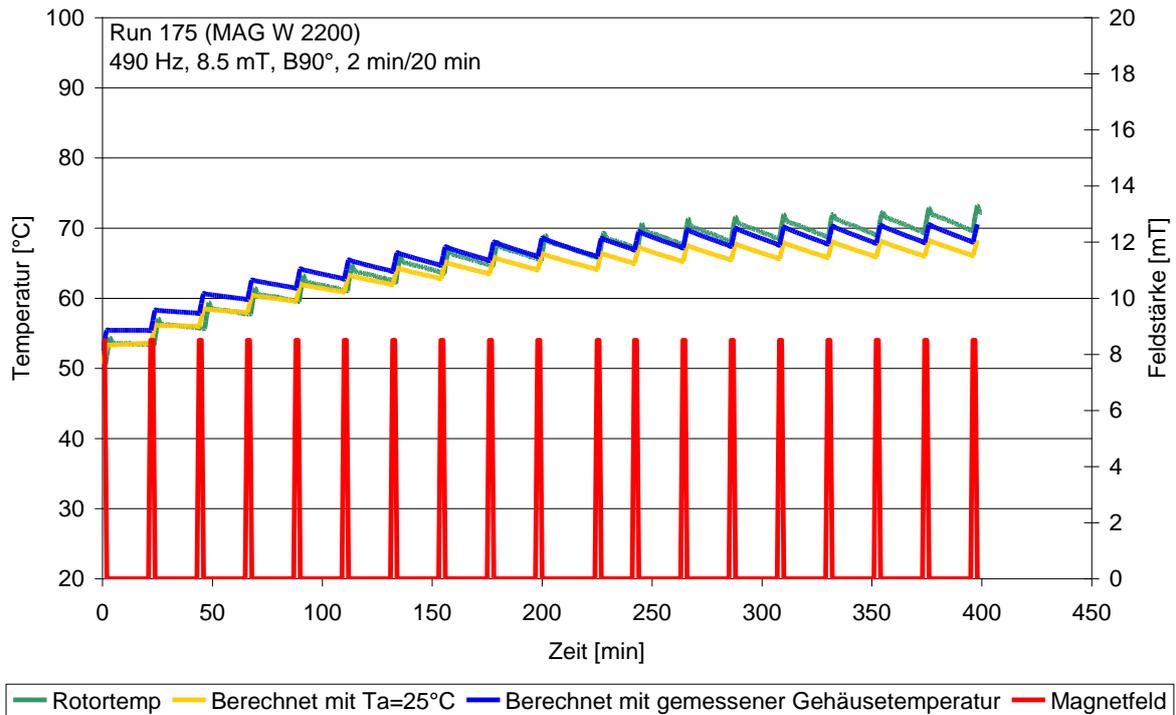


Abbildung 4.36: Rotortemperatur bei einer Pulsung von 2 min (Feld an) zu 20 min (Feld aus)

Der direkte Vergleich der gefitteten Kurven mit der gemessenen Kurve zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messungen. Daraus lässt sich schließen, dass das Modell die Erwärmung bei gepulsten Messungen gut beschreibt und daher auch für zukünftige Vorhersagen benutzt werden kann. Zur Überprüfung der Stabilität wurden die Positionsparameter bei diesen Messungen aufgenommen.

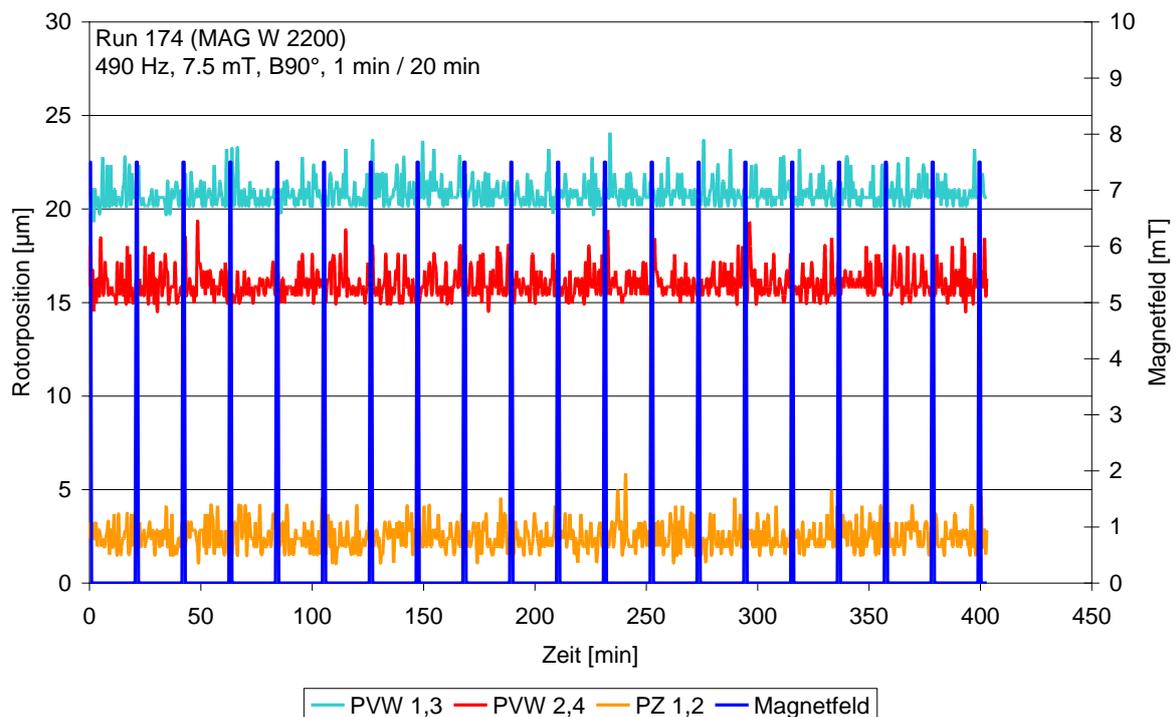


Abbildung 4.37: Lagerposition beim gepulstem Betrieb mit 7,5 mT

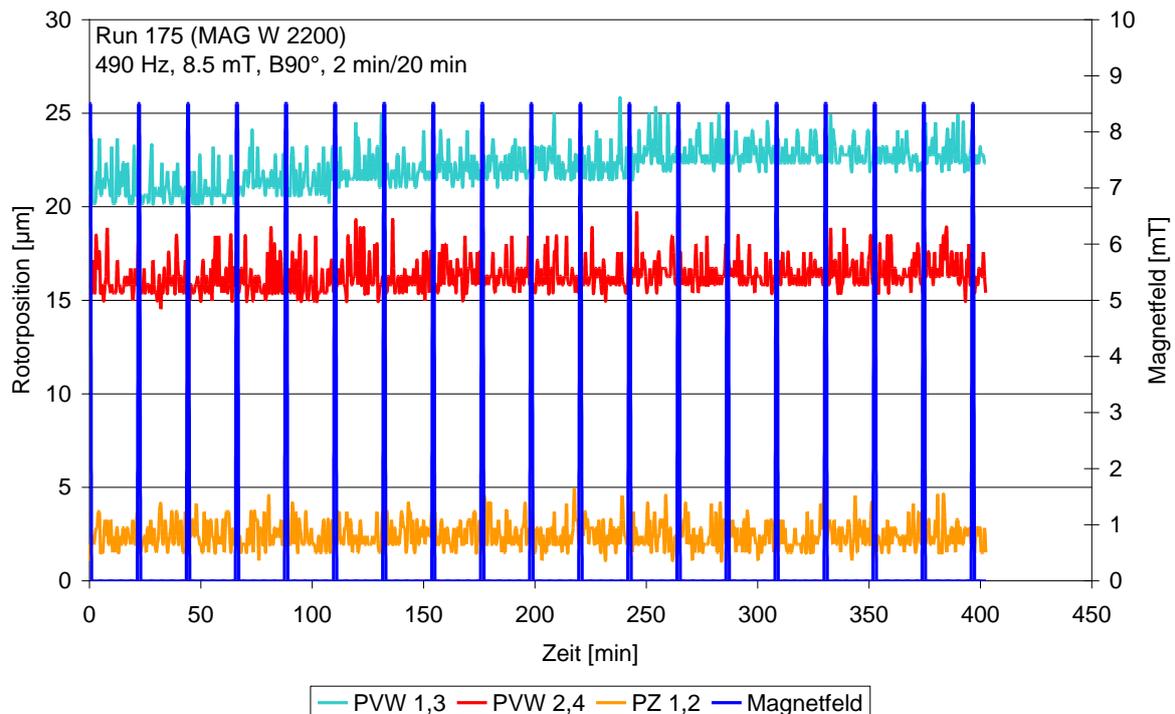


Abbildung 4.38: Lagerposition bei gepulstem Betrieb mit 8,5 mT

Abbildung 4.37 und Abbildung 4.38 zeigen deutlich, dass es bei Magnetfeldern von 7,5 mT bzw. 8,5 mT noch zu keinen starken Veränderungen der Positionsparameter kommt. Lediglich der PVW 1,3-Parameter zeigt, im Vergleich von 7,5 mT zu 8,5 mT, eine um ca. 3 µm verschobene Rotorposition. Die anderen beiden Parameter befinden sich im gleichen Bereich. Das größte Problem sollte daher hauptsächlich, die durch die Wirbelströme bewirkte Abbremsung des Rotors darstellen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Temperaturentwicklung des Rotors von magnetisch gelagerten TMPs bei verschiedenen Magnetfeldern und Gasflüssen mit Hilfe eines Pyrometers gemessen. Zur Beschreibung des Temperaturverlaufs wurde ein empirisches Modell verwendet, das bei Kenntnis einiger weniger Konstanten die Vorhersage der Rotortemperatur ermöglicht.

Die Kalibration des Pyrometers gestaltete sich sehr umfangreich, da mehrere verschiedene Methoden getestet wurden. Um die Betriebsbedingungen unter Vakuum am besten simulieren zu können, wurde der Rotor mit Wirbelströmen erhitzt. Bei allen anderen Methoden wurde das Gehäuse zu stark erhitzt. Das Pyrometer berücksichtigt durch das Wechsellichtverfahren Reflexionen der Wärmestrahlung aus der Gehäusewand, aber nur wenn es die gleiche Temperatur wie das Gehäuse besitzt. Dies ist bei zu schneller Erhitzung des Gehäuses während der Kalibrationsmessung nicht immer gewährleistet. Zudem stellte das Aufbringen des PT100-Sensors auf den Rotor ein großes Problem dar, weshalb auch mehrere Messungen durchgeführt wurden. Im Hinblick auf zukünftige Kalibrationsmessungen wurden verschiedene Verbesserungsvorschläge wie z.B. ein zusätzlichen Flansch, das Ersetzen des PT100-Sensors durch einen Chrom-Nickel-Sensor oder eine grundsätzlich andere Kalibrationsmethode (Kapitel 3.2.3.4). Welche davon zuverlässigere Werte liefern und praktisch gut umgesetzt werden können, muss sich erst durch Versuche zeigen.

Die nach der Kalibration durchgeführten Messungen machen deutlich, dass das entwickelte Modell sehr gut mit den gemessenen Werten übereinstimmt. Daher wird auch eine recht genaue Vorhersage bei bekannten Konstanten ermöglicht. Bei der Berechnung der einzelnen Leistungsbeiträge ergibt sich das Problem, dass die Konstanten eine gute Temperaturvorhersage ermöglichen, die einzelnen Werte der Konstanten jedoch stark von der Art der Messung abhängen. Es ist daher schwer eine genaue Analyse der einzelnen Leistungsbeiträge durchzuführen, da die einzelnen Konstanten korreliert sind.

Speziell für Magnetfelder hat sich gezeigt, dass bereits ab 3,5 mT die für Langzeitoperationen kritische Rotortemperatur von 90°C durch Erwärmung über Wirbelströme erreicht wird. Um dies zu vermeiden, kann, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, eine Magnetfeldabschirmung angebracht werden. Diese leitet die Feldlinien zum Großteil um und reduziert damit die Temperaturerhöhung auf ein Minimum. Die Abschirmung leitet die Feldlinien nur solange um, bis die Sättigung erreicht ist.

Die Messungen mit Gasfluss und ohne Magnetfeld veranschaulichen vor allem, dass sich die Gehäusetemperatur hier weitaus stärker erhöht und zudem erste Beeinträchtigungen der Rotorfrequenz vorhanden sind. Die Rotorfrequenz kann ab 80 sccm nicht mehr aufrecht erhalten werden, da die durch die Reibung erzeugte Abbremsung nicht mehr durch den Motor kompensiert werden kann. Die Erhitzung des Gehäuses wird durch Konvektion und Reibung erzeugt.

Werden sowohl Magnetfeld als auch Gasfluss angelegt, zeigt sich der Kühleffekt des Gases deutlich, wie der Vergleich der jeweiligen Messungen zeigt. Die hohe Wärmeproduktion der Wirbelströme wird durch den Gasfluss über Konvektion zum Teil abgeführt. Daher lassen sich bei konstantem Gasfluss auch stärkere Magnetfelder ohne Erreichen der kritischen Temperatur anlegen.

Da ein angelegtes Magnetfeld nicht nur zu einer Erwärmung des Rotors führt, sondern auch eine Kraft auf den Rotor ausübt, erfolgten zudem Stabilitätstests. Diese verdeutlichen, dass Magnetfelder abhängig von ihrer Stärke starke Auswirkungen auf die Rotorposition und die Frequenz haben. Bei einer Ausrichtung des Magnetfeldes im Winkel von 90° zur Rotorachse spielen die Positionsparameter keine Rolle. Durch die Wirbelströme kommt es bei zu starken Feldern zu einer Verringerung der Rotorfrequenz durch den abbremsenden Effekt. Ist das angelegte Magnetfeld parallel zur Rotorachse ausgerichtet, besitzen die Positionsparameter eine starke Abhängigkeit zum Magnetfeld. Es muss daher immer vermieden werden, bei paralleler Ausrichtung des Magnetfeldes die Feldstärke zu stark zu erhöhen, da es sonst zu einem Versagen des Magnetlagers kommen kann und der Rotor in ein mechanisches Notlager fällt.

Dies ist vor allem im Hinblick auf das JET-Experiment von grundlegender Wichtigkeit, da hier gepulste Magnetfelder verwendet werden. Bei starken gepulsten Feldern ergibt sich das Problem, dass das Magnetfeld nicht langsam hochgefahren wird, sondern plötzlich mit maximaler Stärke anliegt. Somit sind sowohl die Positionsparameter als auch die Rotortemperatur entscheidend. Zu diesem Zweck wurden entsprechende Simulationen der Rotortemperatur mit gepulstem Magnetfeld durchgeführt und mit den gemessenen Daten verglichen. Dabei zeigte sich, dass das entwickelte Modell die Rotortemperatur auch für gepulste Messungen gut vorhersagen kann.

Die durchgeführten Messungen lassen sich nicht ohne weiteres auf andere Typen von TMPs übertragen, da diese sich in Form und Beschaffenheit unterscheiden. Entsprechend müssen für die Vorhersage der Rotortemperatur anderer TMPs erst neue Kalibrierungs- und Temperaturmessungen mit Magnetfeldern und Gasfluss durchgeführt werden, damit die neuen Konstanten berechnet werden können.

Für zukünftige Messungen empfiehlt es sich die vorgestellte alternative Kalibrationsmethode mit Wirbelstromerhitzung für das Pyrometer und die Verwendung des Chrom-Nickel-Sensors zu erproben. Damit sollte es möglich sein wesentlich genauere Werte zu erhalten. Die eigentlichen Messungen sollten andere Gassorten wie z.B. Helium untersuchen. Helium ist sehr leicht im Vergleich zu Stickstoff oder Luft, besitzt aber eine wesentlich größere spezifische Wärmekapazität. Es wäre also interessant zu sehen, wie stark der Kühleffekt im Vergleich zur Reibung ist. Weitere interessante Fragestellungen wären die Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Erwärmung und des Einflusses der Motortemperatur.

Mit dem vorgestellten Modell der Rotortemperatur und den zugehörigen Messungen lassen sich sichere Betriebsbedingungen für TMPs im Magnetfeld vorhersagen. Durch die kontinuierliche Überwachung einiger Parameter (B, Q, T_s) lässt sich auch während des Betriebs die maximale Rotortemperatur, die nicht direkt messbar ist, berechnen. Diese neue Methode lässt sich für verschiedene Anwendungen, wie z.B. Fusionsreaktoren oder Experimenten der Teilchenphysik einsetzen.

Literaturverzeichnis

- [1] KATRIN, <http://www-ik.fzk.de/~katrin/index.html>
- [2] JET, <http://www.jet.efda.org/>
- [3] Ralph Funke, Leybold, Schriftverkehr
- [4] Karl Jousten, Handbook of Vacuum Technology, Wiley-Vch, 2008
- [5] Wikipedia, www.wikipedia.de
- [6] E. Fermi, Versuch einer Theorie der β -Strahlen, I. Zeitschrift für Physik A Hardrons and Nuclei, 88:161-177,1934
- [7] F.Reines und C. Cowan, Detection of the Free Neutrino, Phys.Rev.Letter, 92(3): 830-831,1953
- [8] M. Goldhaber et al., Helicity of Neutrinos, Physical Review 109 Nr.3, 1975
- [9] G.Danby et al., Phys.Rev.Letter, 9, 1962
- [10] K.Kodama et al., Observation of Tau Neutrino Interactions, Physics Letter B, 504(3): 218-224, 2001
- [11] Bruce T. Cleveland et al., Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector, 1997
- [12] Abdurashitov et al., Results from SAGE, 1994
- [13] P. Anselmann et al., GALLEX Solar Neutrino Observations: Complete Results for GALLEX II, 1995
- [14] SNO Collaboration, Direct Evidence for Neutrino-Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, 2002
- [15] Super-Kamiokande-Collaboration, Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos, Phys. Rev. Lett81 (1998)
- [16] The KamLAND Collaboration, MEASUREMENT OF NEUTRINO OSCILLATION WITH KAMLAND: EVIDENCE OF SPECTRAL DISTORTION, Phys.Rev.Lett. 94, 2005
- [17] V.M. Lobashev et al., Direct Search for Neutrino Mass and Anomaly in the Tritium Beta Spectrum: Status of "Troitsk Neutrino Mass" Experiment
- [18] Christian Weinheimer et al., The Mainz Neutrino Mass Experiment, Neutrino 2000
- [19] KATRIN Collaboration, KATRIN Design Report 2004
- [20] Michael Sturm, Aufbau und Test des Inner Loop Systems der Tritiumquelle von KATRIN, 2010
- [21] Florian Fraenkle, Background Investigations of the KATRIN Pre-Specrometer, 2010
- [22] Gil Woosik, Stray Fields around DPS2-F, 15. KATRIN Collaboration Meeting 2008
- [23] Blanket Technology Group, http://www.naka.jaea.go.jp/english/kougaku-e/pfc&blk/BLK/BLK_P1.html
- [24] J. Wolf, B. Bornschein, G. Drexlin, R. Gehring, R. Größle, S. Horn, N. Kernert, S. Riegel, R. Neeb, A. Wagner; Investigation of turbo-molecular pumps in strong magnetic fields; 2010
- [25] Norio Ogiwara et all, Influence of magnetic fields on turbo-molecular-pumps
- [26] John David Jackson, Klassische Elektrodynamik, De Gruyter, 2002
- [27] Uwe Schimpf, Diplomarbeit zum Thema: Fourieranalyse mikroskaliger Temperaturfluktuationen der Wasseroberfläche
- [28] CERN, www.cern.ch
- [29] Mushield, <http://www.mushield.com/index.shtml>
- [30] Academic, Hystersekurve, <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/1092517>

- [31] Mumetal, Shielding calculation formula,
<http://mumetal.co.uk/2009/05/27/shielding-calculation-formula/>
- [32] JUMO, Aufbau und Anwendung von Platin-Temperatursensoren,
[http://www.jumo.de/_C1256CE50036DD09.nsf/4C48EFC7025D021CC1256CF300480F4A/F65895C356FB9403C1256D04002BFEC2/\\$file/t90.6000d.pdf?OpenElement](http://www.jumo.de/_C1256CE50036DD09.nsf/4C48EFC7025D021CC1256CF300480F4A/F65895C356FB9403C1256D04002BFEC2/$file/t90.6000d.pdf?OpenElement)
- [33] Andreas Hofmeier, Temperaturmessung mit PT100-Tabelle und Kennlinie,
www.abmh.de/pt100/tabelle.html
- [34] Heitronics, Infrarot Strahlungspyrometer KT15 II
- [35] Komer-ci, Bedienungsanleitung Infrarot Thermometer VA-6532B,
http://www.komer-ci.de/bedienungsanleitungen/infrarot_thermometer_va-6532.pdf
- [36] Stefan Szepter
- [37] Leybold, MAG Digital Series, Turbomolecular Pump with Magnetic Bearing

ANHANG

A1

Überblick über die Spezifikationen der MAG W 2200 und MAG W 2800 aus [37]

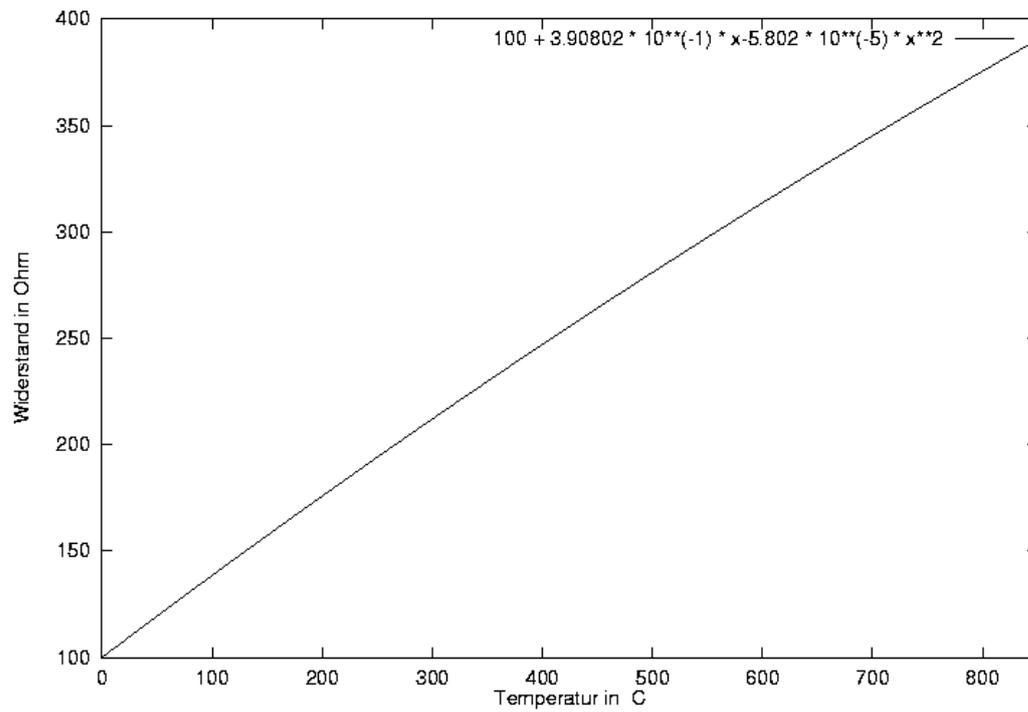
Description

Technical data (continued)

MAG		W 2200 C DN 200	W 2200 C DN 250	W 2800 CT DN 250	W 3200 CT DN 320	W 3200 CT VG 350 JIS
Pumping Speed						
for N ₂	l·s ⁻¹	1600	2000	2650	3200	3200
for Ar	l·s ⁻¹	1450	1900	2450	3000	3000
for H ₂	l·s ⁻¹	1650	1800	2100	2250	2250
Compression for N ₂				> 10 ⁸		
Ultimate pressure	mbar			< 10 ⁻⁸		
Max forvacuum pressure	mbar			2.0		
Rotor speed	min ⁻¹	29,400	29,400	28,800	28,800	28,800
Run-up time	min	< 8	< 8	< 10	< 10	< 10
Braking time with/without venting	min	1 / <7	1 / <7	2 / <9	2 / <9	2 / <9
Cooling				water		
Cooling connection, threads	G			1/8"		
with Swagelok elbow for tube OD	mm	-	-	6.4 (1/4")	6.4 (1/4")	6.4 (1/4")
with stainless steel hose nipples						
for tube ID		1/2"	1/2"	-	-	-
Cooling water temperature	°C			10 to 30		
	°F			50 to 86		
Base flange temperature	°C			20 to 80		
	°F			68 to 176		
Weight	kg	48	48	64	65	66
High-vacuum connection flange	DN	200 ISO-F	250 ISO-F	250 ISO-F	320 ISO-F	VG 350 JIS
Max. high-vacuum flange temperature						
for continuous operation	°C			85		
	°F			185		
Bake-out temperature at						
high-vacuum flange	°C			120		
	°F			248		
Vibration level at high-vacuum flange						
at max. speed	µm			< 0.01		
Fore-vacuum connection flange	DN			40 KF		
Recommended backing pump						
Dry compressing pump with						
pumping speed	m ³ /h			100		
or rotary vane pump	TRIVAC			D 65 BCS		
Admissible ambient temperature	°C			5 to 40		
	°F			40 to 104		
Storage temperature	°C			-10 to +60		
	°F			14 to 140		
Max. relative air humidity				95% (non-condensing)		
Degree of protection (EN 60529)				IP 20		

A2

Widerstandskennlinie eines PT100-Sensors aus [33]



C++-Programm für Histogramme

```

#include "Riostream.h"
void TMPhist(int run) {
//  read TMP run file and save as ROOT tree
//  Author: Joachim Wolf, 08.06.2010
//  Edited by: Sebastian Riegel

//  this file has 15 columns:
//  Ntuple: "t:freq:Im:Tm:Tb:PVW13:PVW24:PZ12:R347:Ta:Tr:Q:B:Ib:th")

//  1. acq.time [sec]
//  2. Rotorfrequenz [rps]
//  3. motor current [A]
//  4. motor temperature [°C]
//  5. bearing temperature [°C]
//  6. rotor PVW13 [mV]
//  7. rotor PVW24 [mV]
//  8. rotor PZ12 [mV]
//  9. R347 [A]
//  10. stator temp. [°C]
//  11. rotor temp. [°C]
//  12. gas flow [sccm]
//  13. magn.field [Gauss]
//  14. I(B) [A]
//  15. time [h]

    TString dir = "C:/root/macros/TMP/";
    ifstream in;
    in.open(Form("%sRUN_%2i_new.txt",dir.Data(),run));

    Float_t p[15];
    Int_t nmin = 0, nmax = 60000;    //run32

    Int_t nlines = 0;

    TFile *f = new TFile(Form("%sTMP%2i.root",dir.Data(),run),"RECREATE");

    TNtuple *ntuple = new TNtuple("ntuple","TMP in B field",
        "t:freq:Im:Tm:Tb:PVW13:PVW24:PZ12:R347:Ta:Tr:Q:B:Ib:th");

// fill ntuple

    Float_t t = 0;
    Float_t t0 = 0;
    Float_t t1 = 0;
    Int_t save_it = 0;

```

```

while (1) {
in >> p[0] >> p[1] >> p[2] >> p[3] >> p[4] >> p[5]
>> p[6] >> p[7] >> p[8] >> p[9] >> p[10] >> p[11]
>> p[12] >> p[13] >> p[14];
if (!in.good() || nlines >= nmax) break;
if (nlines >= nmin) { // all other runs
if (run > 999) {
if (nlines == nmin || p[0]-t0 > 59. || p[0] < t0 ) {
t0 = p[0];
t = t + 60.; // for runs 4144, 4344 and 414344
p[0] = t;
p[14] = t/3600.;
save_it = 1;
}
}
else save_it = 1;
if (p[12] < 0) p[12] = 0.;
if (save_it == 1) ntuple-
>Fill(p[0],p[1],p[2],p[3],p[4],p[5],p[6],p[7],p[8],p[9],p[10],p[11],p[12],p[13],p[14])
;
save_it = 0;

}
nlines++;
}
printf(" found %d points\n",nlines);

in.close();

// fill histogramms

Double_t xmin,xmax,dx;
Double_t x2min,x2max,d2x;
Double_t h[15],h2[15],eh[15];
Int_t nrebin = 1;
Int_t nbins = (Int_t) ntuple->GetEntries();
Int_t hbins = nbins/nrebin;

// Ntuple: "t:freq:Im:Tm:Tb:PVW13:PVW24:PZ12:R347:Ta:Tr:Q:B:Ib:th")

ntuple->SetBranchAddress("t",&p[0]);
ntuple->SetBranchAddress("freq",&p[1]);
ntuple->SetBranchAddress("Im",&p[2]);
ntuple->SetBranchAddress("Tm",&p[3]);
ntuple->SetBranchAddress("Tb",&p[4]);
ntuple->SetBranchAddress("PVW13",&p[5]);
ntuple->SetBranchAddress("PVW24",&p[6]);
ntuple->SetBranchAddress("PZ12",&p[7]);
ntuple->SetBranchAddress("R347",&p[8]);
ntuple->SetBranchAddress("Ta",&p[9]);
ntuple->SetBranchAddress("Tr",&p[10]);
ntuple->SetBranchAddress("Q",&p[11]);
ntuple->SetBranchAddress("B",&p[12]);
ntuple->SetBranchAddress("Ib",&p[13]);
ntuple->SetBranchAddress("th",&p[14]);

ntuple->GetEntry(0);
xmin = p[0];

ntuple->GetEntry(nbins-1);
xmax = p[0];

```

```

dx = (xmax-xmin)/(nbins-1);
xmin = xmin - dx/2.;
xmax = xmax + dx/2.;

d2x = dx*nrebin;
x2min = xmin;
x2max = x2min + d2x * hbins;

// time in hours
xmin = xmin/3600.;
xmax = xmax/3600.;
x2min = x2min/3600.;
x2max = x2max/3600.;

cout << xmin << " , " << xmax << " , " << dx << " , " << x2min << " , " << x2max
<< " , "
<< d2x << " , " << nbins << " , " << hbins << "\n";

hist_freq = new TH1D("hist_freq",";time in h;rotor frequency in
Hz",nbins,xmin,xmax);
hist_Im = new TH1D("hist_Im",";time in h;motor current in A",nbins,xmin,xmax);
hist_Tm = new TH1D("hist_Tm",";time in h;motor temperature in
#circC",nbins,xmin,xmax);
hist_Tb = new TH1D("hist_Tb",";time in h;bearing temperature in
#circC",nbins,xmin,xmax);
hist_PVW13 = new TH1D("hist_PVW13",";time in h;PVW13 in mV",nbins,xmin,xmax);
hist_PVW24 = new TH1D("hist_PVW24",";time in h;PVW24 in mV",nbins,xmin,xmax);
hist_PZ12 = new TH1D("hist_PZ12",";time in h;PZ12 in mV",nbins,xmin,xmax);
hist_R347 = new TH1D("hist_R347",";time in h;R347 current in A",nbins,xmin,xmax);
hist-Ta = new TH1D("hist-Ta",";time in h;stator temperature in
#circC",nbins,xmin,xmax);
hist_Tr = new TH1D("hist_Tr",";time in h;rotor temperature in
#circC",nbins,xmin,xmax);
hist_Q = new TH1D("hist_Q",";time in h;gas flow in sccm",nbins,xmin,xmax);
hist_B = new TH1D("hist_B",";time in h;magnetic field in Gauss",nbins,xmin,xmax);
hist_Ib = new TH1D("hist_Ib",";time in h;coil current in A",nbins,xmin,xmax);

hist2_freq = new TH1D("hist2_freq",";time in h;rotor frequency in
Hz",hbins,x2min,x2max);
hist2_Im = new TH1D("hist2_Im",";time in h;motor current in A",hbins,x2min,x2max);
hist2_Tm = new TH1D("hist2_Tm",";time in h;motor temperature in
#circC",hbins,x2min,x2max);
hist2_Tb = new TH1D("hist2_Tb",";time in h;bearing temperature in
#circC",hbins,x2min,x2max);
hist2_PVW13 = new TH1D("hist2_PVW13",";time in h;PVW13 in mV",hbins,x2min,x2max);
hist2_PVW24 = new TH1D("hist2_PVW24",";time in h;PVW24 in mV",hbins,x2min,x2max);
hist2_PZ12 = new TH1D("hist2_PZ12",";time in h;PZ12 in mV",hbins,x2min,x2max);
hist2_R347 = new TH1D("hist2_R347",";time in h;R347 current in
A",hbins,x2min,x2max);
hist2-Ta = new TH1D("hist2-Ta",";time in h;stator temperature in
#circC",hbins,x2min,x2max);
hist2_Tr = new TH1D("hist2_Tr",";time in h;rotor temperature in
#circC",hbins,x2min,x2max);
hist2_Q = new TH1D("hist2_Q",";time in h;gas flow in sccm",hbins,x2min,x2max);
hist2_B = new TH1D("hist2_B",";time in h;magnetic field in
Gauss",hbins,x2min,x2max);
hist2_Ib = new TH1D("hist2_Ib",";time in h;coil current in A",hbins,x2min,x2max);

```

```

Int_t j=0;
hbins = 0;
for(int i=0; i < 15; i++){
    h[i] =0.;
    h2[i]=0.;
}
for(int i=0; i < nbins; i++) {
    ntuple->GetEntry(i);
    hist_freq->SetBinContent(i+1,p[1]);
    hist_Im->SetBinContent(i+1,p[2]);
    hist_Tm->SetBinContent(i+1,p[3]);
    hist_Tb->SetBinContent(i+1,p[4]);
    hist_PVW13->SetBinContent(i+1,p[5]);
    hist_PVW24->SetBinContent(i+1,p[6]);
    hist_PZ12->SetBinContent(i+1,p[7]);
    hist_R347->SetBinContent(i+1,p[8]);
    hist-Ta->SetBinContent(i+1,p[9]);
    hist-Tr->SetBinContent(i+1,p[10]);
    hist_Q->SetBinContent(i+1,p[11]);
    hist_B->SetBinContent(i+1,p[12]);
    hist_Ib->SetBinContent(i+1,p[13]);

// Ntuple: "t:freq:Im:Tm:Tb:PVW13:PVW24:PZ12:R347:Ta:Tr:Q:B:Ib:th")

    for(int k=0; k < 15; k++){
        h[k] = h[k] + p[k];
        h2[k]= h2[k]+ p[k]*p[k];
    }
    j++;
    if(j >= nrebin){
        hbins++;
        for(int k=0; k < 15; k++){
            h[k] = h[k]/nrebin;
            h2[k]= h2[k]/nrebin;
            eh[k]= sqrt((h2[k] - h[k]*h[k])/(nrebin-1.));
        }

        hist2_freq->SetBinContent(hbins,h[1]);
        hist2_Im->SetBinContent(hbins,h[2]);
        hist2_Tm->SetBinContent(hbins,h[3]);
        hist2_Tb->SetBinContent(hbins,h[4]);
        hist2_PVW13->SetBinContent(hbins,h[5]);
        hist2_PVW24->SetBinContent(hbins,h[6]);
        hist2_PZ12->SetBinContent(hbins,h[7]);
        hist2_R347->SetBinContent(hbins,h[8]);
        hist2-Ta->SetBinContent(hbins,h[9]);
        hist2_Tr->SetBinContent(hbins,h[10]);
        hist2_Q->SetBinContent(hbins,h[11]);
        hist2_B->SetBinContent(hbins,h[12]);
        hist2_Ib->SetBinContent(hbins,h[13]);

        hist2_freq->SetBinError(hbins,eh[1]);
        hist2_Im->SetBinError(hbins,eh[2]);
        hist2_Tm->SetBinError(hbins,eh[3]);
        hist2_Tb->SetBinError(hbins,eh[4]);
        hist2_PVW13->SetBinError(hbins,eh[5]);
        hist2_PVW24->SetBinError(hbins,eh[6]);
        hist2_PZ12->SetBinError(hbins,eh[7]);
        hist2_R347->SetBinError(hbins,eh[8]);
        hist2-Ta->SetBinError(hbins,eh[9]);
        hist2_Tr->SetBinError(hbins,eh[10]);
        hist2_Q->SetBinError(hbins,eh[11]);
        hist2_B->SetBinError(hbins,eh[12]);
    }
}

```

```
hist2_Ib->SetBinError(hbins,eh[13]);

j = 0;
for(int k=0; k < 15; k++){
    h[k] =0;
    h2[k]=0;
}
}

// TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","TMPs in magnetic fields",10,10,600,400);
// hist2_Tr->Draw();

f->Write();
f->Close();

}
```

A4

```
// fit of TMP
//Author: Joachim Wolf, 13.06.2010
//Edited by: Sebastian Riegel

#include "TInterpreter.h"
#include "TCanvas.h"
#include "TSystem.h"
#include "TStyle.h"
#include "TFile.h"
#include "TH2.h"
#include "TNTuple.h"
#include "TPaveLabel.h"
#include "TPaveText.h"
#include "TFrame.h"
#include "TSystem.h"
#include "TCint.h"

Double_t Tr;
Double_t To;
Double_t tn;
Double_t tstart;
Double_t tstop;
Double_t tmin;
Double_t tmax;
Double_t dt;
Double_t TrFit[100000];
Double_t Para[7] = {-1.,0.,0.,0.,0.,0.,0.};

Int_t nlines = 0;
Int_t nstart;
Int_t nstop;
Int_t nmax;
Int_t nbins;
Bool_t fixTa;

TNTuple *ntuple;
TH1D *hist_B;
TH1D *hist_Q;
TH1D *hist_Ta;
TH1D *hist_Tr;
TH1D *hist_Im;
TH1D *hist_Tm;
TH1D *hist2_B;
TH1D *hist2_Q;
TH1D *hist2_Ta;
TH1D *hist2_Tr;
TH1D *hist2_Im;
TH1D *hist2_Tm;
ofstream fout("c:/root/macros/Trfit.txt");
```

```

Double_t ftmp1(Double_t *x, Double_t *par) {

Double_t B,Q,Ta,I,Im,Tm;
Int_t nbin;
Bool_t is_new;

is_new = false;

for (int i=0; i<7; i++) if(Para[i] != par[i]) is_new = true;

// new parameter set? Then calculate the new Tr vs. t histogram

if(is_new) {
for (int i=0; i<7; i++) Para[i] = par[i];
Tr = par[6] ;
for(int i=nstart; i <=nstop; i++) {
B = hist2_B->GetBinContent(i)*10;
Q = hist2_Q->GetBinContent(i);
if (fixTa) Ta = 25. + 273.15;
else Ta = hist2_Ta->GetBinContent(i) + 273.15;
Tm = hist2_Tm->GetBinContent(i)+273.15;
I = hist2_Im->GetBinContent(i)-par[5];

//////////
// Model 1 //
//////////
//Tr = Tr + (par[1] + par[0]*B*B/(1.+3.9e-3*(Tr-293.15)) +
par[4]*((Ta+82.79185)*(Ta+82.79185)*(Ta+82.79185)*(Ta+82.79185) - Tr*Tr*Tr*Tr)
// + par[2]+ par[3]*((Ta+82.79185) - Tr)*Q)*dt; // temperature dependent
resistance
Tr = Tr + (par[1] + par[0]*B*B/(1.+3.9e-3*(Tr-293.15)) + par[4]*(Ta*Ta*Ta*Ta
- Tr*Tr*Tr*Tr)
+ par[2]*Q+ par[3]*(Ta - Tr)*Q)*dt; // temperature dependent resistance

TrFit[i] = Tr;
}
}

nbin = (x[0] - tmin)/dt + 1;
Tr = TrFit[nbin];
fout << nbin << "\t" << (Tr-273.15) << endl;
return (Tr - 273.15);
}

```

```

Double_t ftmp2(Double_t *x, Double_t *par) {

Double_t B,Q,Ta,I;
Int_t nbin;
Bool_t is_new;

is_new = false;
for (int i=0; i<7; i++) if(Para[i] != par[i]) is_new = true;

// new parameter set? Then calculate the new Tr vs. t histogram

if(is_new) {
for (int i=0; i<7; i++) Para[i] = par[i];
Tr = par[6] ;
for(int i=nstart; i <=nstop; i++) {
B = hist2_B->GetBinContent(i);
Q = hist2_Q->GetBinContent(i);
if (fixTa) Ta = 25. + 273.15;
else Ta = hist2_Ta->GetBinContent(i) + 273.15;
I = hist2_Im->GetBinContent(i);
//////////
// Model 2 //
//////////
Tr = Tr + (par[0] + par[1]*I + par[2]*I*I+ par[3]*(Ta - Tr)*Q
+ par[4]*(Ta*Ta*Ta*Ta - Tr*Tr*Tr*Tr))*dt ;

TrFit[i] = Tr;
}
}

nbin = (x[0] - tmin)/dt + 1;
Tr = TrFit[nbin];
//fout << nbin << "\t" << (Tr-273.15) << endl;
return (Tr - 273.15);
}

void TMPfit(int run,int model,int weight,int prediction,int bearing,int fluss, int
magnet) {

// run = 41, 43, 44 model = 1,2 weight = 0,1 prediction = 0(fit),1(use fitted
parameters)
// bearing = 0: use Ta = T(extern), bearing = 1: use Ta = Tb

cout << "run: " << run << ", model: " << model << ", weight: " << weight << ",
prediction: "
<< prediction << ", Ta: " << bearing << ", Fluss: " << fluss << ", Magnetfeld: " <<
magnet << endl;

TString dir = "C:/root/macros/TMP/";

char datafile[] = Form("%sTMP%i.root",dir.Data(),run);
TFile *f = new TFile(datafile,"READ");

cout << "opened file: " << datafile << endl;

ntuple = (TNTuple*)f->Get("ntuple");
hist_B = (TH1D*)f->Get("hist_B");
hist_Q = (TH1D*)f->Get("hist_Q");
hist_Ta = (TH1D*)f->Get("hist_Ta");
hist_Tr = (TH1D*)f->Get("hist_Tr");
hist_Im = (TH1D*)f->Get("hist_Im");
hist_Tm = (TH1D*)f->Get("hist_Tm");

```

```

hist2_B = (TH1D*)f->Get("hist2_B");
hist2_Q = (TH1D*)f->Get("hist2_Q");
if (bearing == 1) hist2_Ta = (TH1D*)f->Get("hist2_Tb"); // bearing temperature
else hist2_Ta = (TH1D*)f->Get("hist2_Ta");
if (bearing > 1) fixTa = true;
else fixTa = false;
hist2_Tr = (TH1D*)f->Get("hist2_Tr");
hist2_Im = (TH1D*)f->Get("hist2_Im");
hist2_Tm = (TH1D*)f->Get("hist2_Tm");

TCanvas *c1 = new TCanvas("c1", "TMP in a B field", 10, 10, 700, 400);
c1->SetBorderMode(0);
c1->SetFillColor(0);

Int_t nbin;

nbins = hist2_Tr->GetNbinsX();
dt = hist2_Tr->GetBinWidth(1);
tmin = hist2_Tr->GetXaxis()->GetXmin();
tmax = hist2_Tr->GetXaxis()->GetXmax();

tstart = tmin + dt*20.;

tstop = tmax - dt*20.;

nstart = (tstart - tmin)/dt + 1;
nstop = (tstop - tmin)/dt + 1;
To = (hist2_Tr->GetBinContent(nstart) + 273.15);

printf("%10f %10f %10f \n", tmin, tmax, dt);

hist2_Tr->SetTitle(";time [h];rotor temperature [#circC]");
gStyle->SetOptStat(0);
gStyle->SetOptFit(11);

hist2_Tr->UseCurrentStyle();

Double_t ymin, ymax;

ymin = 20;

ymax = 120.0;

hist2_Tr->SetMinimum(ymin);
hist2_Tr->SetMaximum(ymax);

hist2_Tr->GetXaxis()->SetLabelFont(42);
hist2_Tr->GetXaxis()->SetTitleFont(42);
hist2_Tr->GetYaxis()->SetLabelFont(42);
hist2_Tr->GetYaxis()->SetTitleFont(42);
hist2_Tr->GetXaxis()->SetLabelSize(0.05);
hist2_Tr->GetXaxis()->SetTitleSize(0.05);
hist2_Tr->GetYaxis()->SetLabelSize(0.05);
hist2_Tr->GetYaxis()->SetTitleSize(0.05);

// fit function

```

```

TF1 *fTMP;
if (model == 1){
  fTMP = new TF1("fTMP1",ftmp1,tstart,tstop,7);
  fTMP->SetParNames("k_{1}", "k_{2}", "k_{3}", "k_{4}", "k_{5}", "I_{M,0}", "T_{0}");
// model 1
  fTMP->SetNpx(nstop-nstart+1);
  fTMP->SetParameters(1.35296e-2,
                    1.36446e1,
                    0.415677,
                    1.05897e-2,
                    3.51935e-9,
                    0.0,
                    To);
  fTMP->SetLineColor(4);
}
else {
  fTMP = new TF1("fTMP2",ftmp2,tstart,tstop,7);
  fTMP-
>SetParNames("#tilde{k}_{1}", "#tilde{k}_{2}", "#tilde{k}_{3}", "#tilde{k}_{4}", "#tilde{k}
}_{5}", "I_{M,0}", "T_{0}"); // model 2
  fTMP->SetNpx(nstop-nstart+1);
  fTMP->SetParameters(-0.8,
                    13.0,
                    4.0,
                    6.0e-3,
                    1.8e-9,
                    0.0,
                    To);
  fTMP->SetLineColor(2);
}
fTMP->SetLineWidth(2);
fTMP->SetLineStyle(1);

if (model == 2) fTMP->FixParameter(5,0.); // not used

if (fluss == 0)
{
  fTMP->FixParameter(2,0.);
  fTMP->FixParameter(3,0.);
}
if (magnet == 0)
{
  fTMP->FixParameter(0,0.);
}
fTMP->FixParameter(5,0.); // I_M0
fTMP->FixParameter(6,To); // To
// fTMP->SetParLimits(1,0.0,1000.0);

```

```

if (prediction > 0) {
if (model == 1) {
// model 1, run 43, 44, no weight
if (bearing == 1) { // T(bearing)
ftMP->FixParameter(0,0.006214); // k1: B^2
ftMP->FixParameter(1,1.078); // k2: constant
ftMP->FixParameter(2,0.0331); // k3: gas flow: friction
ftMP->FixParameter(3,0.007588); // k4: gas flow: conductance
ftMP->FixParameter(4,1.749e-9); // k5: radiation
}
else if (bearing > 1) { // fixed Ta
ftMP->FixParameter(0,0.006544); // k1: B^2
ftMP->FixParameter(1,3.91); // k2: constant
ftMP->FixParameter(2,0.1532); // k3: gas flow: friction
ftMP->FixParameter(3,0.004718); // k4: gas flow: conductance
ftMP->FixParameter(4,1.612e-9); // k5: radiation
}
else {
ftMP->FixParameter(0,0.006283); // k1: B^2
ftMP->FixParameter(1,3.486); // k2: constant
ftMP->FixParameter(2,0.1304); // k3: gas flow: friction
ftMP->FixParameter(3,0.006135); // k4: gas flow: conductance
ftMP->FixParameter(4,1.773e-9); // k5: radiation
}
}
else {
// model 2, run 43,44, no weight
if (bearing == 1) { // T(bearing)
ftMP->FixParameter(0,-2.784); // k1: constant
ftMP->FixParameter(1,11.29); // k2: motor current I
ftMP->FixParameter(2,6.827); // k3: I^2
ftMP->FixParameter(3,0.04209); // k4: gas flow: conductance
ftMP->FixParameter(4,1.827e-9); // k5: radiation
}
else if (bearing > 1) { // fixed Ta
ftMP->FixParameter(0,-0.01779); // k1: constant
ftMP->FixParameter(1,12.43); // k2: motor current I
ftMP->FixParameter(2,3.512); // k3: I^2
ftMP->FixParameter(3,0.008532); // k4: gas flow: conductance
ftMP->FixParameter(4,1.601e-9); // k5: radiation
}
else {
ftMP->FixParameter(0,-0.7696); // k1: constant
ftMP->FixParameter(1,13.49); // k2: motor current I
ftMP->FixParameter(2,3.700); // k3: I^2
ftMP->FixParameter(3,0.01332); // k4: gas flow: conductance
ftMP->FixParameter(4,1.779e-9); // k5: radiation
}
}
}
}

hist2_Tr->SetAxisRange(tstart,tstop);
hist2_Ta->SetAxisRange(tstart,tstop);

if (weight == 1) hist2_Tr->Fit(ftMP,"MR"); // weight = 1/sigma2
else hist2_Tr->Fit(ftMP,"WWMR"); // weight = 1

hist2_Ta->SetLineWidth(2);

```

```

hist2_Ta->SetLineColor(1);
hist2_Ta->SetLineStyle(1);
if (bearing < 2) hist2_Ta->Draw("same");

// char runtext[] = Form("run %2i model %1i (with R(T))",run,model);
if (bearing > 1) char runtext[] = Form("model %1i with T_{S} = 20#circC",model);
else char runtext[] = Form("model %1i with measured T_{S}",model);

TText text;
text.SetTextSize(0.05);
text.SetTextAlign(31);
text.SetTextFont(42);
text.SetTextAlign(22);

TLatex ltext;
ltext.SetTextSize(0.05);
ltext.SetTextAlign(31);
ltext.SetTextFont(42);
ltext.DrawLatex(tstart+0.95*(tstop-tstart),ymin+0.90*(ymax-ymin),runtext);

ltext.SetTextAlign(11);

TBox box;
box.SetLineWidth(1);
box.SetLineColor(0);
box.SetLineStyle(1);
box.SetFillStyle(1001);

Double_t x1,x2,y1,y2;
Double_t xoffset = 0.;

text.SetTextSize(0.04);

// delete f;
}

```

A5

```

// fit of TMP for pulsed measurements
//Author: Joachim Wolf, 10.06.2010

#include "TInterpreter.h"
#include "TCanvas.h"
#include "TSystem.h"
#include "TStyle.h"
#include "TFile.h"
#include "TH2.h"
#include "TNTuple.h"
#include "TPaveLabel.h"
#include "TPaveText.h"
#include "TFrame.h"
#include "TSystem.h"
#include "TCint.h"
#include "Riostream.h"

Double_t deltaT(Double_t Tr, Double_t dt, Double_t B, Double_t Q) {

    Double_t dTr;
    Double_t Ta = 20. + 273.15;
    //Double_t par[5] = {1.21110e-2, 7.76114, 0, 0, 2.29513e-9};
    Double_t par[5] = {1.41927e-2, 7.35210, 0, 0, 2.32879e-9};

    ////////////////
    // Model 1 //
    ////////////////

    dTr = (par[1] + par[0]*B*B/(1.+3.9e-3*(Tr-293.15)) + par[4]*(Ta*Ta*Ta*Ta -
Tr*Tr*Tr*Tr)
          + par[2]*Q + par[3]*(Ta - Tr)*Q)*dt;

    return (dTr);
}

void JET_simu(Double_t t_B, Double_t t_pause, Double_t B, Double_t Q) {
// simulate T_r(B,Q) for a pulsed magnetic field
// Author: Joachim Wolf, 15.06.2010

// define histograms

    Double_t xmin = 0.;
    Double_t xmax = 12.; // time on h
    Int_t nbins = 3600*xmax; // 1 sec step size
    Double_t dx = (xmax-xmin)/(nbins);
    Double_t Tr = 40.;
    Double_t t,t_Bh,t_pauseh;
    Int_t nB,npause;

    nB = t_B/3600./dx + 0.49;
    npause = t_pause/3600./dx + 0.49;

    cout << "simulating " << nB << " steps with B=" << B << "mT and Q=" << Q <<
          "sccm and " << npause << " steps with B=0mT" << endl;

    TCanvas *c1 = new TCanvas("c1","TMP in a B field",10,10,700,400);
    c1->SetBorderMode(0);
    c1->SetFillColor(0);

```

```

TFile *f = new TFile("C:/root/myroot/TMP/JET_simu.root","RECREATE");

hist_JET = new TH1D("hist_JET",";time [h];rotor temperature [#circC]",
    nbins,(xmin-dx/2.),xmax+dx/2.);

hist_B = new TH1D("hist_B",";time [h];B [mT]",
    nbins,(xmin-dx/2.),xmax+dx/2.);
hist_Q = new TH1D("hist_Q",";time [h];gasflow [sccm]",
    nbins,(xmin-dx/2.),xmax+dx/2.);

// fill histograms

bool B_is_on = false;
int steps = 0;

for (int nx = 0; nx < nbins; nx++){
    if (B_is_on){
        Tr = Tr + deltaT(Tr+273.15,dx,B,Q);
        hist_B->SetBinContent(nx+1,B);
        steps++;
        if (steps >= nB) {
            steps = 0;
            B_is_on = false;
        }
    }
    else {
        Tr = Tr + deltaT(Tr+273.15,dx,0.,Q);
        hist_B->SetBinContent(nx+1,0.);
        steps++;
        if (steps >= npause) {
            steps = 0;
            B_is_on = true;
        }
    }

    hist_JET->SetBinContent(nx+1,Tr);
    hist_Q->SetBinContent(nx+1,Q);
}

// plot histograms T vs. B

gStyle->SetOptStat(0);
hist_JET->UseCurrentStyle();
hist_JET->SetMinimum(0.0);
hist_JET->SetMaximum(120.0);

hist_JET->GetXaxis()->SetLabelFont(42);
hist_JET->GetXaxis()->SetTitleFont(42);
hist_JET->GetYaxis()->SetLabelFont(42);
hist_JET->GetYaxis()->SetTitleFont(42);
hist_JET->GetXaxis()->SetLabelSize(0.05);
hist_JET->GetXaxis()->SetTitleSize(0.05);
hist_JET->GetYaxis()->SetLabelSize(0.05);
hist_JET->GetYaxis()->SetTitleSize(0.05);
// hist_JET->SetAxisRange(0.,100.);

hist_JET->SetLineColor(1);
hist_JET->SetLineWidth(2);
hist_JET->DrawClone();

TGaxis *axis = new TGaxis(gPad->GetUxmax(),gPad->GetUymin(),
    gPad->GetUxmax(), gPad->GetUymax(),0,120,510,"+L");

```

```

axis->SetTitle("B [mT]");
axis->SetLabelFont(42);
axis->SetTitleFont(42);
axis->SetLabelFont(42);
axis->SetTitleFont(42);
axis->SetLabelSize(0.05);
axis->SetTitleSize(0.05);
axis->SetLabelSize(0.05);
axis->SetTitleSize(0.05);
axis->Draw();

hist_B->DrawClone("same");

TText text;
text.SetTextSize(0.05);
text.SetTextAlign(11);
text.SetTextFont(42);
text.DrawTextNDC(0.3,0.4,"Simulation of a pulsed B field");
text.SetTextSize(0.04);
text.DrawTextNDC(0.3,0.35,
  Form("B field: %2.0f mT, gas flow: %2.0f sccm",B,Q));
text.DrawTextNDC(0.3,0.3,
  Form("repetition cycle: %3.1f min, pulse with: %3.1f min",
  (t_B + t_pause)/60.,t_B/60.));

TLatex ltext;
ltext.SetTextSize(0.05);
ltext.SetTextAlign(31);
ltext.SetTextFont(42);
ltext.DrawLatex(3.,85.,"T_{R}");

// write histogramms and close file

f->Write();
// f->Close();

}

```