

**Entwicklung und Test einer kombinierten
Kühlung und Stromversorgung
für das CMS-Tracker-Upgrade**

Jochen Ebert

29. Januar 2009

Diplomarbeit
Institut für Experimentelle Kernphysik IEKP
Universität Karlsruhe (TH)

Referent: Prof. Dr. Wim de Boer

Korreferent: Prof. Dr. Thomas Müller

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Der LHC und die Detektoren	3
1.1.1	Der Large Hadron Collider	3
1.1.2	Die Detektoren	3
1.1.3	Die Ziele	4
1.2	Atlas	5
1.3	CMS	6
1.4	LHCb	8
1.5	Alice	9
1.6	Kühlung und Stromversorgung der Detektoren	9
2	Silizium als Detektormaterial	11
2.1	Grundlagen	11
2.2	Der p-n Übergang	13
2.3	Silizium als Teilchendetektor	14
2.4	Wechselwirkung der Strahlung mit Silizium	16
2.5	Strahlungsschäden	19
2.6	Übersicht strahlungsinduzierter Schädigungen	21
2.7	Annealing	24
3	Kühlung und Stromversorgung des CMS-Trackers	25
3.1	Aufbau des CMS-Trackers	25
3.2	Stromversorgung des CMS-Trackers	25
3.3	Kühlung des CMS-Trackers	28
3.4	Materialbudget des CMS-Trackers	28
4	CO₂ als 2-Phasen Kühlmedium	31
4.1	Vorteile von CO ₂ als 2-Phasen Kühlmedium	31
4.2	Fluidodynamische Grundlagen	34
4.3	Die LHCb CO ₂ Kühlanlage	45
5	Prototyp einer neuen Kühlung und Stromversorgung für den CMS-Tracker	51
5.1	Aufbau des Prototyps	53
5.2	Stromversorgungsschema	57
5.3	Materialbudget und Verlustleistung	59
5.4	Temperaturauslese	60

5.5	Aufbau der CO ₂ Kühlanlage	61
5.6	Ergebnisse	62
5.6.1	Qualität der Isolationsbox	62
5.6.2	Simulation der Halteblöcke	63
5.6.3	Gemessene Spannungsabfälle des Systems	65
5.6.4	Abkühlung von Raumtemperatur	66
5.6.5	Temperaturregelung	67
5.6.6	Dry-Out	69
5.6.7	Druckabfall	71
5.7	Nächste Schritte	73
6	Zusammenfassung	81
7	Anhang	83

Abbildungsverzeichnis

1.1.1	Der LHC und seine Detektoren	4
1.2.2	Schematischer Aufbau des ATLAS-Detektors	6
1.3.3	Schematischer Aufbau des CMS-Detektors	7
1.4.4	Schematischer Aufbau des LHCb-Detektors	9
1.5.5	Schematischer Aufbau des Alice-Detektors	10
2.1.1	Bandstrukturen von Halbleiter, Metall und Isolator	12
2.2.2	Bandverbiegung	13
2.3.3	Aufbau eines Siliziumsensoren	15
2.4.4	Bethe-Bloch Kurve für Silizium	17
2.4.5	Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung	18
2.5.6	Niel-Hypothese	20
2.6.7	Effektive Dotierung - Typinversion	23
2.6.8	Ausbreitung des depletierten Bereiches	24
(a)	vor Typinversion	24
(b)	nach Typinversion	24
3.1.1	Schematische Ansicht des CMS-Trackers	26
3.1.2	Schematische Seitenansicht des CMS-Trackers	27
3.2.3	Verlustleistung mit und ohne Kabel	27
3.3.4	Position der Kühlsysteme in der CMS-Kaverne	29
3.3.5	Schematischer Aufbau des CMS-Tracker Kühlsystems	30
3.4.6	Materialbudget des CMS-Trackers	30
4.1.1	Enthalpie-Druck Diagramm von CO ₂	32
4.1.2	Phasendiagramm von CO ₂	33
4.1.3	Vergleich der Eigenschaften von CO ₂ mit anderen Kühlmedien	34
(a)	dP/dT verschiedener Kühlmedien	34
(b)	Verdampfungsenthalpie verschiedener Kühlmedien	34
(c)	Viskosität verschiedener Kühlmedien	34
(d)	Vergleich Dampf zu Flüssigkeitsdichte	34
4.2.4	Strömungstopologien bei einer senkrechten Leitung	37
4.2.5	Strömungstopologien einer horizontalen geheizten/gekühlten Leitung	38
4.2.6	Flow Regimes Map	42
4.2.7	Strömungstopologien bei horizontaler Leitung	44
4.3.8	Übersicht der LHCb-VELO Kühlanlage	45

4.3.9	P-H Diagramm der LHCb-VELO Kühlanlage im Betrieb	47
4.3.10	Verschiedene Betriebsmodi der LHCb-VELO Kühlanlage	48
5.0.1	Super-Modul	52
5.0.2	Schematische Darstellung des Trackers mit längerer Barrelsektion	53
5.1.3	Schematische Darstellung des Prototyps	53
5.1.4	Übersicht der Versuchsanordnung	54
5.1.5	Heizplatine	56
5.2.6	Stromversorgung des Prototyps	57
5.2.7	Spannungen bei verschiedenen Stromversorgungsschemata	58
5.2.8	Querschnitt mit Stromschienen	59
5.2.9	verwendete Stromschienen	60
5.6.10	Simulation des Halteblocks	64
5.6.11	Gemessene Spannungen an den Heizplatinen	65
5.6.12	Temperaturkurve bei Abkühlung	66
5.6.13	Temperaturregelung über den Druck	68
5.6.14	Dry-Out bei 0,75 kg pro h	70
5.6.15	Dry-Out bei 1,5 kg pro h	71
5.6.16	Maximal abführbare Wärmeleistung über CO ₂ -Fluss	72
5.6.17	Temperaturverlauf über Rohrlänge	73
5.7.18	Vergleich der großen und kleinen Halteblöcke	74
5.7.19	Simulation der verkleinerten Halteblöcke	75
5.7.20	Schematischer Aufbau des geschlossenen Kühlsystems	78
(a)	ohne Wärmelast	78
(b)	mit Wärmelast	78
5.7.21	Funktionsweise einer Membranpumpe	79
7.0.1	Zeichnung Halteblock groß	84
7.0.2	Zeichnung Halteblock Gegenstück groß	85
7.0.3	Zeichnung Stromschiene 1,79	86
7.0.4	Zeichnung Stromschiene 3,04	87
7.0.5	Zeichnung Stromschiene 4,21	88
7.0.6	Zeichnung Stromschiene 5,56	89
7.0.7	Zeichnung Stromschiene 7,46	90
7.0.8	Zeichnung Stromschiene 10,54	91
7.0.9	Zeichnung Halteblock klein	92
7.0.10	Zeichnung Gegenstück Halteblock klein	93
7.0.11	Maske der verwendeten Heizplatine	94

Tabellenverzeichnis

4.1	Thermodynamische Eigenschaften von C_3F_8 und CO_2	33
5.1	Physikalische Eigenschaften verschiedener Aluminiumlegierungen . .	55

1 Einleitung

Knapp 100 Jahre nach dem berühmten Streuversuch von Rutherford, bei welchem dieser Alphateilchen auf eine nur etwa 1000 Atomlagen dicke Goldfolie schoss und aus den unerwarteten Ergebnissen das Rutherfordsche Atommodell entwickelte, nahm am 10. September 2008 der Large Hadron Collider (LHC) in Genf seinen Betrieb auf. Mit diesem leistungsstärksten und technologisch fortschrittlichsten Teilchenbeschleuniger der Welt könnte sich eine Tür für neue Physik jenseits des Standardmodells eröffnen.

Der LHC hat einen Umfang von fast 27km und ist in einem Tunnel in etwa 100 Meter Tiefe installiert. Er ist in der Lage Protonen bis auf eine Schwerpunktsenergie von 14 TeV und Bleiionen auf bis zu 1150 TeV zu beschleunigen. Der LHC erreicht dabei eine Luminosität von 10^{34} Teilchen pro Quadratzentimeter und Sekunde, welche in einem zukünftigen Upgrade noch weiter erhöht werden wird. Die gegenläufigen Teilchenstrahlen können an vier verschiedenen Orten zur Kollision gebracht werden. An diesen Kollisionspunkten befinden sich die vier Detektoren CMS, ATLAS, LHCb und ALICE, die die dabei entstehenden Teilchenschauer nachweisen und mit den erhaltenen Daten eine Grundlage für neue physikalische Theorien bieten. Aufgrund der hohen Schwerpunktsenergie sowie der hohen Luminosität sind Teile dieser Detektoren einer erheblichen Strahlenbelastung ausgesetzt.

Der CMS-Detektor besitzt einen zwiebelschalenartigen Aufbau. Im Inneren, direkt um den Wechselwirkungspunkt, ist der Spurdetektor (Tracker) angeordnet. Dieser besteht aus Pixel- und Streifensensoren aus Silizium. Die nächste Schale bildet das elektromagnetische Kalorimeter, gefolgt vom hadronischen Kalorimeter. Für das bis zu 3,8 Tesla große Magnetfeld sorgt der supraleitende Magnet, welcher die nächste Schale bildet. Darauf folgen die Myonenkammern, welche die äußerste Lage darstellen.

Für den innersten Detektor, den Tracker, gilt es in besonderem Maße verschiedene Designregeln zu erfüllen. So muss er zum einen die höchste Strahlungsbelastung aller Subdetektoren ertragen, was eine effiziente Kühlung erfordert, um die Siliziumdetektoren trotz zunehmender Strahlenschädigung im erlaubten Betriebsbereich zu halten. Zum anderen muss er sehr leichtgewichtig ausgelegt sein, um die zu detektierenden Teilchen so wenig wie möglich zu beeinflussen. Diese zwei Parameter sind im jetzigen Tracker noch nicht optimal gelöst. Auf der einen Seite arbeitet die Kühlung nicht vollkommen zufriedenstellend, auf der anderen Seite ist die Strahlungslänge des Trackers, die von den zu vermessenden Teilchen passiert werden muss, verhältnismäßig groß (siehe Abbildung 3.4.6). Je nach Winkel, relativ zum Strahlrohr, der den Tracker passieren-

den, Teilchen, ist ein großer Teil der Gesamtstrahlungslänge des Trackers dem Kühlsystem sowie der Stromversorgung geschuldet. An diesen Punkten besteht also die Möglichkeit bei einem zukünftigen Upgrade des Trackers eine deutliche Verbesserung zu erzielen. Neben verschiedenen anderen Konzepten stellt die Kombination der notwendigen Kühlröhrchen, der Kabel für die Stromversorgung sowie der mechanischen Halterung in eine einzige Struktur einen vielversprechenden Weg dar, das Materialbudget substantiell zu verringern. Das Kühlmedium, das dabei zum Einsatz kommen soll, ist Kohlenstoffdioxid. Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften bietet es unverkennbare Vorteile. So ist es als 2-Phasen Kühlmedium in der Lage eine sehr viel größere Wärmemenge pro Gramm Kühlflüssigkeit als das derzeit verwendete 1-Phasen Medium C_6F_{14} aufzunehmen. Zum anderen erlaubt CO_2 , aufgrund der sehr kleinen auftretenden Druckabfälle, die Verwendung sehr langer und dünner Kühlleitungen. Dies erlaubt es eventuell einen anderen Aufbau des Trackers zu verwenden und auf diese Art und Weise das Materialbudget im Trackingvolumen weiter zu reduzieren.

Um die Aspekte einer CO_2 Kühlung sowie die Möglichkeit einer Integration der Stromversorgung, der Kühlleitungen sowie der mechanischen Halterung in eine einzige Struktur zu untersuchen, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit ein erster Prototyp für eine mögliche Anordnung der Detektormodule sowie eine einfache CO_2 -Kühlanlage erstellt.

1.1 Der LHC und die Detektoren

1.1.1 Der Large Hadron Collider

Der LHC ist mit 34 beteiligten Nationen ein Gemeinschaftsprojekt internationalen Ausmaßes. Er befindet sich unter dem Grenzgebiet zwischen Frankreich und der Schweiz in einem zwischen ca. 50 bis 175 Meter tiefen und knapp 26,659km im Umfang messenden Tunnel, in welchem bis zum Jahr 2000 der Elektron-Positron Beschleuniger LEP installiert war. Um die Protonen mit einer Energie von bis zu 7TeV auf einer solchen Kreisbahn zu halten, bedarf es eines etwa 9 Tesla starkes Magnetfeldes. Da eine solche Magnetfeldstärke wirtschaftlich nur mittels Supraleitung realisiert werden kann, sind etwa 1300 supraleitende Dipolmagnete zur Krümmung der Teilchenbahn sowie weitere ebenfalls supraleitende Quadrupolmagnete zur Strahlfokussierung verbaut. Genutzt wird der Effekt der Supraleitung auch bei den Beschleunigerkavitäten, sie sind so in der Lage die Teilchenenergie pro Umlauf um 485keV zu erhöhen. Im Betrieb werden über 2800 Teilchenpakete in die beiden auf 4,5 Kelvin gekühlten Strahlrohre gefüllt, wovon wiederum jedes der Pakete etwa 10^{11} Protonen enthält. Dies führt zu einem sehr großen Strahlstrom von 0,56Ampere, was in Zusammenhang mit der ausgiebig verwendeten supraleitenden Technologie zu besonderen Schwierigkeiten führt. Die Kollisionsrate der Teilchenpakete liegt bei 40MHz. Da die Ereignisse, die man mittels der Detektoren nachzuweisen sucht, sehr selten auftreten, musste der LHC auch im Bereich der Luminosität neue Maßstäbe setzen. Sie liegt mit $10^{34}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ etwa einhundert mal höher als bei dem bisher leistungsstärksten Hadronenbeschleuniger, dem Tevatron am Fermi National Accelerator Laboratory in den USA. Die hohe Luminosität wird es erlauben auch seltene Ereignisse mit einer annehmbaren Statistik zu untersuchen. Es laufen aber bereits Planungen diese substantiell zu erhöhen, um auch seltenste Ereignisse studieren und die Statistik weiter verbessern zu können.

1.1.2 Die Detektoren

Um die vier Wechselwirkungspunkte des LHC sind die Detektoren Atlas, Alice, CMS und LHCb angeordnet. Jeder Detektor muss bei jetziger Luminosität etwa 10^{11} Teilchen pro Sekunde verarbeiten, was mit einer erheblichen Strahlenbelastung sowie einer anfallenden Datenrate in einem Bereich von Terabyte pro Sekunde verbunden ist. Diese, von LHC vorgegebenen sehr schwierigen Verhältnisse, stellen sehr hohe Anforderungen an die einzelnen Detektoren, denen nur durch viele Neuentwicklungen in Teilchennachweis, Elektronik und Mechanik begegnet werden konnte.

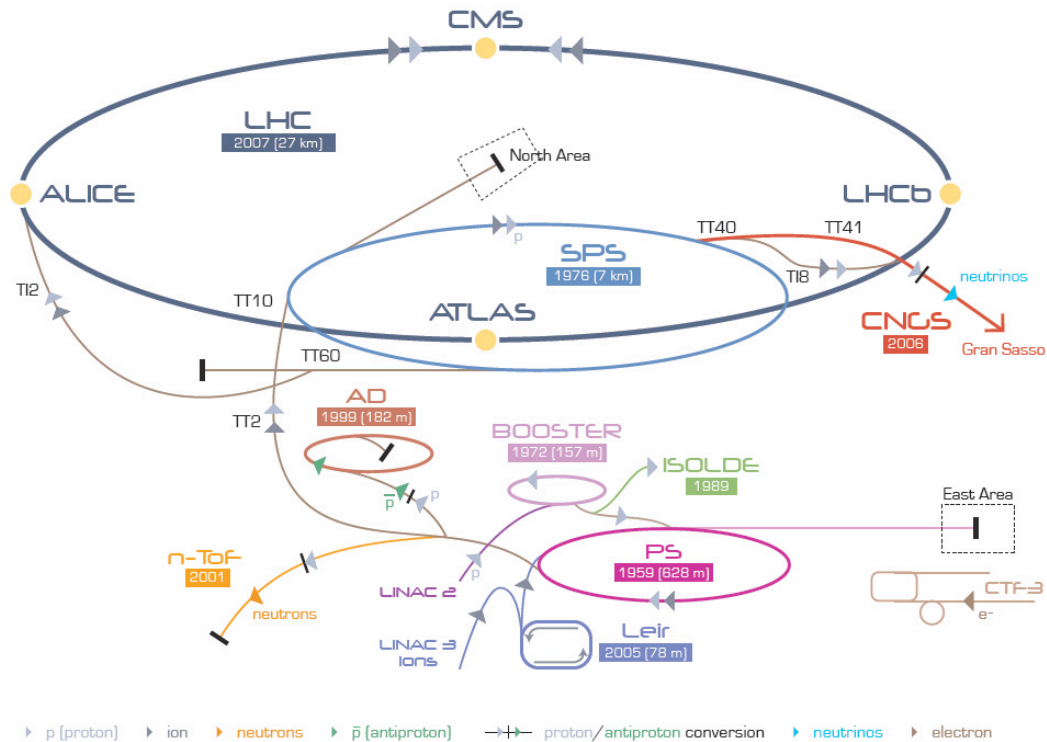


Abbildung 1.1.1: Übersicht des Beschleunigerkomplexes am Cern. Der Large Hadron Collider wird durch verschiedene Vorbeschleuniger gespeist und ist in der Lage die injizierten Protonen bis auf 7 TeV zu beschleunigen. Er hat einen Umfang von etwa 27 km und liegt in einer Tiefe von 50-175 Meter schräg unterhalb der Grenze zwischen Frankreich und der Schweiz. [Cer06]

1.1.3 Die Ziele

Die Ziele, die mit dem Bau des LHC verfolgt werden, sind sehr vielfältig. So soll vorrangig die sehr interessante Frage nach dem Ursprung der Masse von Elementarteilchen geklärt werden. Es wird vermutet, dass sie diese durch Wechselwirkung mit dem Higgsfeld erhalten, weshalb nach dem Feldquant dieses Feldes, dem Higgs-Boson, gesucht wird (Atlas und CMS). Außerdem sollen Hinweise auf Supersymmetrie, welche Fermionen und Bosonen ineinander überführt, erforscht werden. Man sucht dazu nach supersymmetrischen Partnern der heute bereits bekannten Elementarteilchen (Atlas und CMS). Ein drittes, wichtiges Feld ist die Untersuchung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen, was helfen könnte, die Asymmetrie von Materie und Antimaterie im Universum zu erklären (LHCb). Neben diesen erhofften Entdeckungen wird der LHC auch Top-Quarks in großer Zahl erzeugen und so eine deutlich genauere Untersuchung der Eigenschaften dieses Teilchens ermöglichen. Der zweite Betriebsmodus des LHC, bei dem Bleikerne anstatt Protonen beschleunigt werden, dient zur Erzeugung eines Quark-Gluonen-Plasmas, mit dem die Bedingungen, wie sie kurz nach dem Urknall geherrscht haben, nach-

gebildet und erforscht werden sollen (Alice).

Ferner besteht durch die hohe Schwerpunktsenergie und Luminosität des LHC die Möglichkeit auf neue, unerwartete Phänomene zu stoßen, für die noch kein theoretischer Erklärungsversuch vorliegt.

1.2 Atlas

Der Atlas-Detektor ist der größte der vier Detektoren am LHC-Beschleunigerring. Er besitzt imposante Ausmaße und ist mit einer Länge von 46 Meter, einem Durchmesser von 25 Meter sowie einem Gewicht von 7000 Tonnen der weltweit größte Teilchendetektor, welcher jemals an einem Beschleuniger errichtet wurde.

Die innersten drei Lagen rund um das Strahlrohr bestehen aus Silizium-Pixeldetektoren, welche die feinste Auflösung der Teilchenspuren ermöglichen. Daran schließen sich drei Lagen aus Silizium-Streifendetektoren an, welche nach dem gleichen Nachweisprinzip wie die Pixeldetektoren arbeiten. Die einzelnen Silizium-Streifensensoren bieten dabei nur eine Auflösung in zwei Raumdimensionen, erst durch Kombination von mindestens zwei Lagen mit zueinander gekreuzten Streifen wird die dritte Raumkoordinate bestimmt. Die äußerste Lage des inneren Detektors bildet der Übergangsstrahlungsdetektor (TRD), welcher in der Lage ist rund 30 weitere Spurpunkte zu liefern.

Den Anschluss an den inneren Detektor bildet das Kalorimetersystem. Es besteht seinerseits aus einem Vorwärtskalorimeter, dem elektromagnetischen Kalorimeter sowie dem hadronischen Kalorimeter. Alle drei dienen dazu die Energie sowie den Ort der verschiedenen auftreffenden Teilchen zu bestimmen. Die äußersten Lagen des empfindlichen Detektorvolumens bilden die Myonenkammern, von welchen zwei verschiedene Arten verbaut wurden. Zum einen gibt es die precision chambers, welche eine gute Orts- und Impulsauflösung bieten, zum anderen die Myonenkammern, welche sich durch ihre besonders hohe Auslesegeschwindigkeit auszeichnen. Mit ihrer Hilfe ist es unter anderem möglich physikalisch interessante Ereignisse, welche neue Physik jenseits des Standardmodells enthalten könnten, von solchen mit bereits bekannter Physik zu trennen. Auf diese Art kann die anfallende Datenrate des Detektors auf ein beherrschbares Maß reduziert werden, um eine Weiterverarbeitung zu ermöglichen.

Wie fast jeder Teilchendetektor besitzt auch Atlas ein Magnetfeld. Dazu ist der innere Detektor von einem Magnetsystem aus supraleitenden Toroidalspulen umgeben, welche zylinderförmig um den inneren Detektor angeordnet sind. Die Feldstärke beträgt zwei Tesla und ist durch die spezielle Anordnung der Spulen sehr homogen.

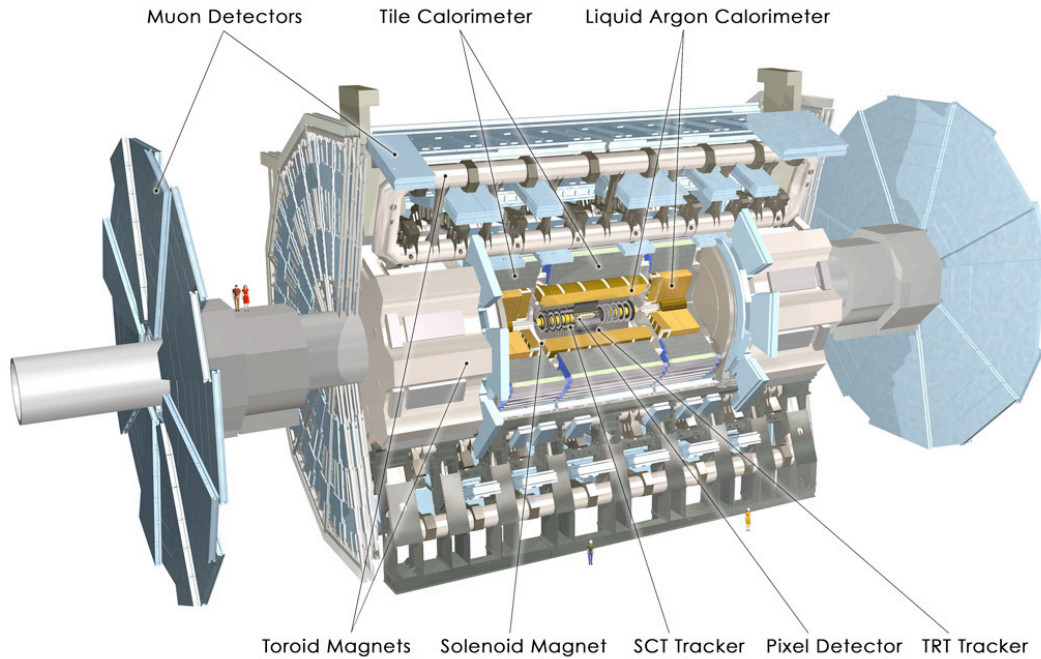


Abbildung 1.2.2: Schematischer Aufbau des ATLAS-Detektors

1.3 CMS

Der CMS-Detektor (**C**ompact **M**uon **S**olenoid) ist zwar nicht der größte, dafür aber mit seinen Maßen von 21 Meter Länge, einem Durchmesser von 15 Meter sowie einem Gewicht von 12500 Tonnen der mit Abstand schwerste Detektor am LHC. Der CMS-Detektor wurde gebaut um die gleichen physikalischen Ziele zu erforschen, wie dies auch der Atlas-Detektor tut. Hier kommen jedoch andere technische Lösungen und im Besonderen ein anderes Magnetsystem zum Einsatz.

Wie fast alle modernen Teilchendetektoren besitzt auch CMS einen zwiebel-schalenförmigen Aufbau. Die innersten drei Lagen bestehen aus Siliziumpixel-detektoren und den dazugehörigen Endkappen. Die 65 Millionen einzelnen Pixel haben dabei eine Größe von $100\text{ }\mu\text{m}$ mal $150\text{ }\mu\text{m}$ und bilden zusammen einen Subdetektor von der Größe einer Schuhschachtel. Im Anschluss daran befinden sich 10 Lagen des Siliziumstreifendetektors, welcher bis zu einem Radius von 1,3 Meter um das Strahlrohr reicht. Dieser Siliziumstreifendetektor besteht seinerseits aus vier inneren zylindrischen Lagen (TIB - **T**racker **I**nnner **B**arrels) sowie den dazugehörigen zwei inneren Endkappen (TID - **T**racker **I**nnner **D**isk). Daran schließen sich die sechs äußeren zylindrischen Lagen (TOB - **T**racker **O**uter **B**arrel) und zwei Endkappen (TEC - **T**racker **E**nd**C**aps) an, welche den Tracker nach Außen hin abschließen.

Der nach Außen nächste Subdetektor ist das elektromagnetische Kalorimeter (ECAL) mit einer zylindrischen Lage und zwei Endkappen. Es besteht aus

75848 transparenten Blei-Wolfram-Kristallen (PbWO_4), welche eine sehr große Dichte aufweisen und szintillierende Eigenschaften besitzen. Ausgelesen werden die Kristalle mittels Avalanche Fotodioden (APD) für die Barrel Sektion beziehungsweise mittels Fototrioden an den Endkappen, da hier die höhere Strahlungsbelastung einen Einsatz der APDs verbietet. Die gesamten Blei-Wolfram-Kristalle müssen dabei auf einer konstanten Temperatur mit einer Abweichung von weniger als 0.1 Kelvin gehalten werden, da sich die Lichtausbeute der Kristalle stark mit der Temperatur verändert und somit ohne konstante Temperatur keine exakte Energieauflösung möglich wäre.

Die nächste Zwiebelschale nach dem ECAL bildet das hadronische Kalorimeter (HCAL). Es ist als Samplingkalorimeter aufgebaut und besteht aus sich abwechselnden Lagen eines Absorbers und eines Plasikszintillators. Das eingesetzte Absorbermaterial für die Barrel Sektion ist Stahl, beziehungsweise Messing für die Endkappen. Das erhaltene Szintillationslicht wird über wellenlängenschiebende Fasern zu speziellen Photodioden (HPDs) übertragen, die es in ein elektrisches Signal umsetzen.

Den äußeren Abschluss von CMS bilden vier Lagen mit zusammen 1400 Myo-

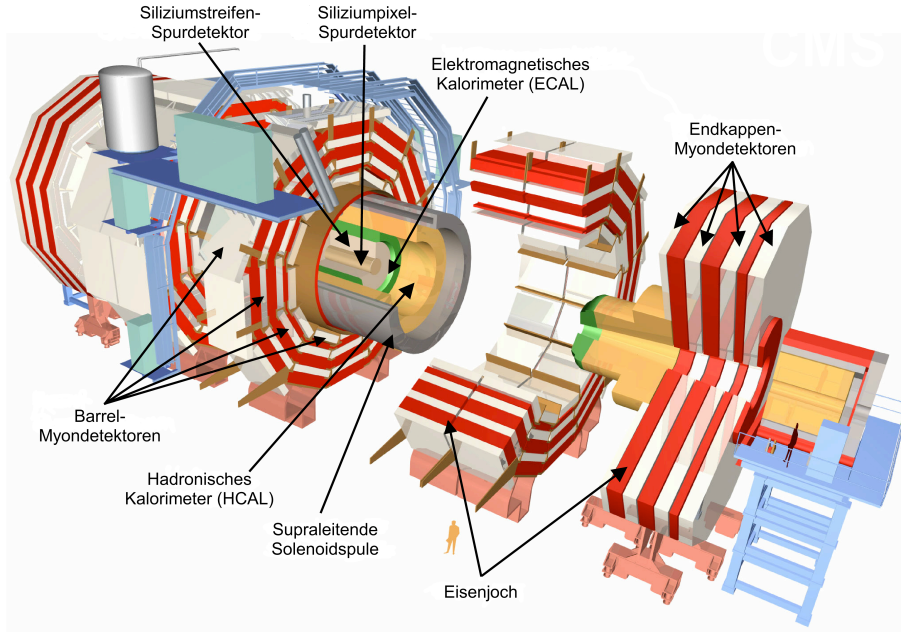


Abbildung 1.3.3: Schematischer Aufbau des CMS-Detektors

nenkammern, welche wie der Name CMS schon vermuten lässt einen integralen Beitrag zum Gesamtdetektor liefern. Sie sind durch eine massive Eisenkonstruktion abgeschirmt, die nur von Myonen und Neutrinos überwunden werden kann. Es gibt insgesamt drei verschiedene Arten von Myonenkammern. Die Driftröhren (DT - **D**rift **T**ubes), welche für den Barrel eingesetzt werden, die Kathoden-Streifen-Kammern (CSC -**C**athode **S**trip **C**hamber) für die

Endkappen sowie die Widerstandsplatten-Kammern (RPC - **R**esistive **P**late **C**hambers) welche hauptsächlich als Triggersystem eingesetzt werden, da sie über eine sehr gute Zeitauflösung verfügen.

Um den Impuls der Teilchen bestimmen zu können, ist es notwendig, ein möglichst starkes Magnetfeld innerhalb des Detektorvolumens zu haben, welches bei CMS mittels des größten jemals gebauten supraleitenden Magneten erreicht werden konnte. Er ist als Zylinderspule aufgebaut, um das HCAL angeordnet und in der Lage ein Magnetfeld von 4 Tesla im Inneren von CMS zu erzeugen. Um den supraleitenden Magneten zu schonen und auch nach dem Upgrade des LHC funktionsfähig zu halten, wird er jedoch nur bei 3,8 Tesla betrieben. Als Abschirmung nach außen besitzt der CMS-Magnet ein mehrteiliges, zwölfkockiges Rückführjoch aus Eisen, innerhalb dessen sich die Myonenkammern befinden. Durch diese geschickte Konstruktion dient das notwendige Rückführjoch somit gleichzeitig als Abschirmung der Myonenkammern vor anderen Teilchen.

1.4 LHCb

Anders als CMS und ATLAS umschließt der LHCb-Detektor den Wechselwirkungspunkt nicht vollständig, sondern wurde als Vorwärtsspektrometer gebaut, was bedeutet, dass der Detektor nur einen Halbraum der physikalisch interessanten Ereignisse abdeckt. Im Einzelnen besteht der Detektor aus dem Silizium VELO (**V**ertex **L**ocator), welchem der RICH (**R**ing **I**maging **C**herenkov) Detektor folgt. Der nächste Punkt auf der Bahn der Teilchen besteht aus einem normalleitenden Magneten gefolgt von einem Tracker. Dieser besteht im inneren Teil (nahe des Strahlrohrs) aus Silizium und im äußeren Teil aus Driftkammern. Anschließend folgt ein weiterer RICH-Detektor, verschiedene Kalorimeter (ECAL, HCAL) sowie das Myonensystem. Im Gegensatz zu CMS und ATLAS umfasst das Untersuchungsfeld des LHCb Detektors weniger allgemeine Bereiche und ist auf die Erforschung der CP-Verletzung im System der B-Mesonen spezialisiert. Was LHCb für diese Diplomarbeit besonders interessant macht, ist die Tatsache, dass ein auf Kohlenstoffdioxid (CO_2) basierendes Kühlsystem für den VELO Subdetektor verwendet wird, auf welches an späterer Stelle noch genauer eingegangen wird.

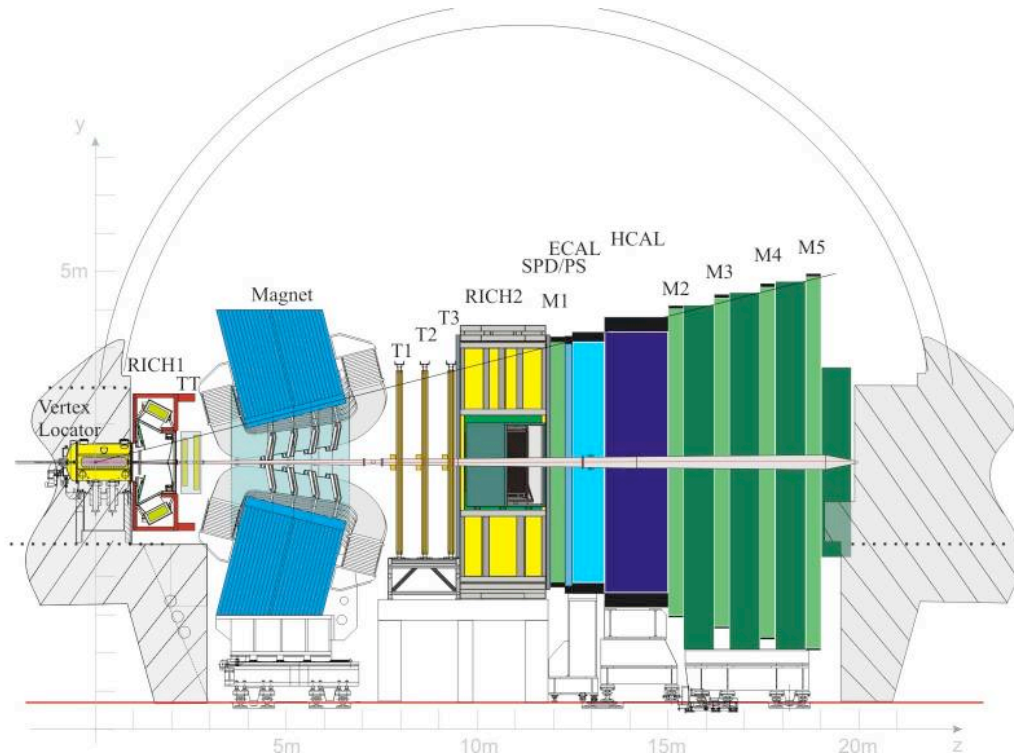


Abbildung 1.4.4: Schematischer Aufbau des LHCb-Detektors [The08b]

1.5 Alice

Der Alice Detektor wurde im Gegensatz zu den drei anderen Detektoren nicht für die Erforschung von Proton-Proton-Kollisionen gebaut, sondern für den zweiten Betriebsmodus des LHC, bei dem Bleiionen bis auf erwartete 1146 TeV beschleunigt werden und kollidieren. Dabei wird ein Zustand erreicht, der dem Zustand kurz nach dem Urknall ähnelt und ein Quark-Gluonen-Plasma bildet. Auch der Alice-Detektor hat eine beachtliche Größe; er ist 26 Meter lang, bei einem Durchmesser von 16 Meter und einem Gewicht von 10000 Tonnen. Aufgebaut ist er aus einer zylindrischen Sektion sowie einem einseitigen Vorwärtsmyonspektrometer zur Erfassung der Myonen.

1.6 Kühlung und Stromversorgung der Detektoren

Trotz der zum Teil sehr unterschiedlichen Mess- und Nachweisprinzipien der vier einzelnen Großdetektoren, haben sie auch Gemeinsamkeiten. Sie alle erfordern eine effiziente Stromversorgung und Kühlung für einige ihrer Subdetektoren. Man mag die Kühlung und Stromversorgung angesichts der hochkomplexen, an der Grenze der technischen und physikalischen Machbarkeit betriebenen, Detektortechnik unterschätzen, was sich jedoch als fataler Fehler herausstellen würde. Genau wie die komplette Sensortechnik, ist auch die

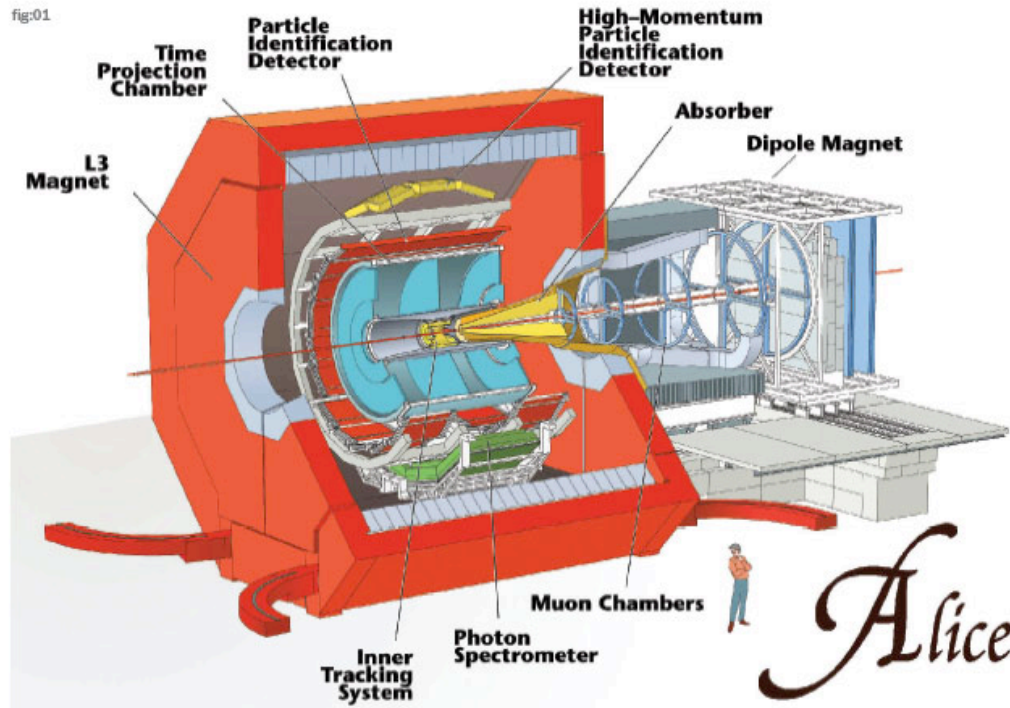


Abbildung 1.5.5: Schematischer Aufbau des Alice-Detektors

ausreichende, homogene und zuverlässige Kühlung, wie auch Stromversorgung, welche ausreichende Granularität, geringe Leitungsverluste, geringes Rauschen und hohe Stabilität bieten muss, ein Gebiet in dem noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten ist. Nur so können die gestellten Herausforderungen bestmöglich und mit so wenig Material wie möglich erfüllt werden. Auch sollte man die Entwicklung der Subdetektoren und teilweise auch des kompletten Detektors nicht getrennt für die eigentlichen Sensoren und Ausleseelektronik usw. betreiben, sondern von Anfang an ein Gesamtkonzept, welches Kühlung und Stromversorgung als integrale Bestandteile einschließen muss, verfolgen.

2 Silizium als Detektormaterial

Um zu verstehen, welche Anforderungen an Kühlung und Stromversorgung der Bau eines Siliziumdetektors stellt, müssen zunächst die speziellen Eigenschaften und Verhaltensweisen von Silizium betrachtet werden. Silizium steht in der vierten Hauptgruppe des Periodensystems und besitzt halbleitende Eigenschaften. Es ist eines der wichtigsten Halbleiterelemente und wird bevorzugt als Halbleiterdetektor in Hochenergieexperimenten eingesetzt. Durch die hohe Strahlenbelastung eines solchen Siliziumdetektors kommt es zu verschiedenen Effekten, welche sowohl die mikroskopischen als auch die makroskopischen Eigenschaften des Siliziumsensors beeinflussen. Um unerwünschte Effekte zu vermeiden, ist es daher nötig, die Schädigungsmechanismen näher zu betrachten.

2.1 Grundlagen

Die elektrische Leitfähigkeit σ eines Halbleiters liegt mit $10^{-9} \frac{1}{\Omega cm} < \sigma < 10^2 \frac{1}{\Omega cm}$ zwischen der von Leitern (z.B. Metallen) und Isolatoren. Sie hängt von diversen Größen wie beispielsweise der Temperatur, der Dotierung und der Beleuchtung (Bestrahlung) ab. Die physikalischen Eigenschaften eines Halbleiters lassen sich mittels des Bändermodells erklären. Die regelmäßige Anordnung von Atomen im Halbleiter führt dazu, dass sich aus den Energieniveaus der einzelnen Atome verschiedene Energiebänder bilden. Das letzte bei $T = 0$ voll besetzte Band ist das Valenzband. Darüber liegt das Leitungsband (siehe Abbildung 2.1.1). Bei einem Halbleiter und einem Isolator liegt zwischen Valenzband und Leitungsband eine Energielücke, welche bei einem Halbleiter mit 0,3eV-4eV jedoch deutlich kleiner als bei einem Isolator (~ 10 eV) ist. Die Größe dieser Energielücke ist es, nach der die Einteilung zwischen Halbleiter und Isolator erfolgt. Dies wird klar, wenn man sich vergegenwärtigt, dass für die Ladungsträger das Pauliprinzip Gültigkeit hat und die Besetzung der Bänder daher nach der Fermiverteilung erfolgt. Bei $T=0$ ist sowohl bei einem Halbleiter, als auch bei einem Isolator das Valenzband vollständig gefüllt und das Leitungsband leer. Beide sind bei dieser Temperatur also Nichtleiter. Wird die Temperatur aber erhöht, so reicht die thermische Aktivierungsenergie bei einem Halbleiter aus, damit einzelne Elektronen die Bandlücke überwinden und ins Leitungsband gelangen können. Bei Isolatoren ist die Bandlücke jedoch zu groß, so dass dieser Effekt nicht auftreten kann. Elektrischer Strom kann nur innerhalb eines nicht vollständig gefüllten Bandes übertragen werden, da nur in einem nicht vollen Band weitere Zustände für die Ladungsträger zu

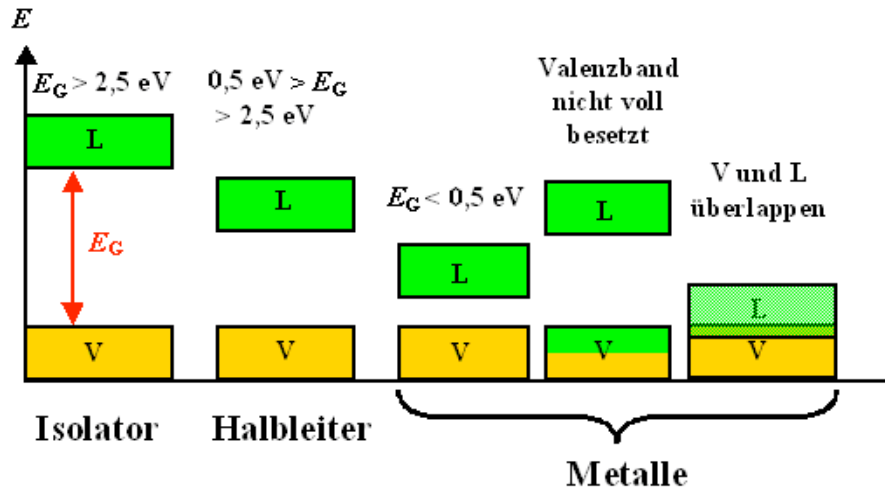


Abbildung 2.1.1: Vergleich der Bandstrukturen von Leiter, Halbleiter und Isolator. Von einem Halbleiter spricht man, wenn der Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband größer als $2,5\text{ eV}$ ist. Zwischen $0,5\text{ eV}$ und $2,5\text{ eV}$ wird das Material als Halbleiter eingestuft. Überlappen sich Valenz- und Leitungsband, ist das Valenzband nicht vollständig besetzt oder liegt die Energielücke unter $0,5\text{ eV}$, so handelt es sich um einen Leiter.

Verfügung stehen, in die sie wechseln können. Diese beweglichen Ladungsträger können Elektronen aus dem Valenzband sein, die in das Leitungsband gewechselt haben oder Löcher im Valenzband, die diese Elektronen zurückgelassen haben. Ein Loch im Valenzband kann als positiver Ladungsträger betrachtet werden, welcher sich im elektrischen Feld wie ein Teilchen mit positiver Ladung bewegt. Die Konzentration der zur Stromleitung beitragenden Elektronen (n) und Löcher (p) ist daher gleich. Für die Besetzungskonzentration von Elektronen gilt folgende Gleichung:

$$n = N_{LB} \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_{LB}}{k_B T}\right) \quad (2.1)$$

Dabei ist N_{LB} die effektive Zustandsdichte im Leitungsband, k_B die Boltzmannkonstante, T die Temperatur und E_F die Fermienergie, die bei einem intrinsischen Halbleiter bei $T = 0$ genau zwischen Leitungs- und Valenzband liegt. Für die Konzentration der Löcher gilt:

$$p = N_{VB} \cdot \exp\left(\frac{E_{VB} - E_F}{k_B T}\right) \quad (2.2)$$

Bei reinem Silizium ist nun aber $n = p$ selbst bei Raumtemperatur so gering, dass es den Strom nur sehr schlecht leitet. Um dies zu ändern und n und p zu erhöhen, kann man Fremdatome in den Siliziumkristall einbauen. Je nachdem aus welcher Hauptgruppe diese stammen unterscheidet man zwischen Donatoren (V Hauptgruppe) und Akzeptoren (III Hauptgruppe). Donatoren besitzen

ein Valenzelektron mehr als Silizium und haben somit ein überschüssiges Elektron, das nicht für die Kristallbindung benötigt wird. Das Energieniveau dieses Elektrons liegt nur knapp unterhalb des Leitungsbandes, so dass es leicht in dieses wechseln kann. Baut man ein Akzeptoratom in einen Siliziumkristall ein, so fehlt dem Akzeptoratom ein Elektron um alle Bindungen mit den umliegenden Siliziumatomen eingehen zu können. Durch dieses fehlende Elektron wird ein neuer Zustand knapp überhalb des Valenzbandes gebildet, der von einem Elektron des Siliziumkristalls besetzt werden kann und somit ein Loch im Valenzband zurücklässt.

2.2 Der p-n Übergang

Bringt man p und n dotiertes Silizium zusammen, so bildet sich an der Kontaktstelle ein p-n Übergang aus. Die Elektronen aus dem n-Bereich diffundieren in den p-Bereich und rekombinieren dort mit den Löchern. Diese Diffusionsbewegung findet jedoch nur bis zu einem gewissen Grad statt, da das Feld der geladenen Atomrümpfe diesem entgegensteht und sich so ein Gleichgewicht ausbildet. Direkt an der Kontaktstelle und einer kleinen Zone um diese herum existieren daher keine freien Ladungsträger mehr und die geladenen Atomrümpfe bilden eine Raumladungszone. Um den Verlauf des elektrischen Feldes im Bereich der Kontaktstelle sowie die Breite der ladungsträgerverarmten Zone zu bestimmen, kann die Poissongleichung herangezogen werden.

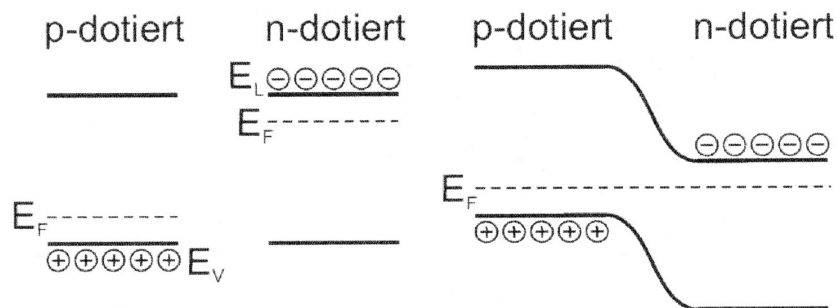


Abbildung 2.2.2: Werden p und n dotierte Bereiche zusammengefügt, so kommt es an der Kontaktstelle zu einem Verbiegen der Energiebänder, so dass ein stetiger Übergang entsteht. [Kra06]

$$\frac{d^2\varphi_{A,D}}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0} = -q\frac{N_{A,D}}{\epsilon\epsilon_0} \quad (2.3)$$

Dabei steht N für die Konzentration von Donatoren, beziehungsweise Akzeptoren. Die Indizes A und D stehen für Akzeptor und Donator. Bei φ

bezieht sich A und D auf den p beziehungsweise n-Bereich. Man integriert die Poissongleichung nun zweimal und fordert ein Verschwinden von elektrischem Feld sowie elektrischem Potenzial an den Rändern der Verarmungszone ($E(x = -w_A) = E(x = w_D) = 0$) sowie ($\varphi(x = -w_A) = \varphi(x = w_D) = 0$). Hier stehen w_A und w_D für die Dicke der Verarmungszone im jeweiligen Bereich, gemessen in Richtung der Flächennormalen der Kontaktstelle (x-Richtung). Für den p-Bereich (Index A) ergibt dies:

$$E(x) = \int \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0} dx - \frac{d\varphi}{dx} = \frac{qN_A}{\epsilon\epsilon_0}(w_A - x) \quad (2.4)$$

$$\varphi(x) = \frac{qN_A}{\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{x^2}{2} - w_A x + \frac{w_A^2}{2} \right) \quad (2.5)$$

Setzt man in Gleichung 2.5 $x = 0$ ein und löst nach w_A auf, so ergibt sich:

$$w_A = \sqrt{\frac{2\varphi_A(0)\epsilon\epsilon_0}{qN_A}} = \sqrt{\frac{2U_A\epsilon\epsilon_0}{qN_A}} \quad (2.6)$$

Die gleiche Rechnung muss man nun noch für das n-Gebiet (Index D) durchführen und die Ladungsneutralität

$$N_A w_A = N_D w_D \quad (2.7)$$

benutzen. Als Ergebnis erhält man die Breite der ladungsträgerverarmten Zone:

$$w = w_A + w_D = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_A + U_D)(N_A + N_D)}{qN_A N_D}} \quad (2.8)$$

Die Spannung $U_A + U_D$ ist diejenige Spannung, die sich durch die Diffusion der Ladungsträger innerhalb des p-n Übergangs einstellt. Legt man nun zusätzlich eine äußere Spannung an, so kann man je nach Polarität im Vergleich zur Diffusionsspannung dafür sorgen, dass die Breite der Verarmungszone zu- oder abnimmt. Für eine Zunahme der Breite muss die von außen angelegte Spannung die gleiche Polarität wie die interne Diffusionsspannung haben. Bei umgekehrter Polarität nimmt die Breite ab, beziehungsweise die ladungsträgerverarmte Zone verschwindet völlig. Da in diesem Fall freie Ladungsträger vorhanden sind, ist der p-n Übergang in der Lage Strom zu leiten. Diese unterschiedlichen Leitfähigkeiten des p-n Übergangs werden in einer Diode genutzt. Liegt der Pluspol der externen Spannung am p dotierten Bereich und der Minuspol am n dotierten, so leitet die Diode. Bei umgekehrter Polarität sperrt sie.

2.3 Silizium als Teilchendetektor

Um Silizium als Teilchendetektor einzusetzen, ist hauptsächlich der Betrieb in Sperrrichtung der Diode von Interesse. Der schematische Aufbau eines solchen

Detektors ist in Abbildung 2.3.3 zu sehen.

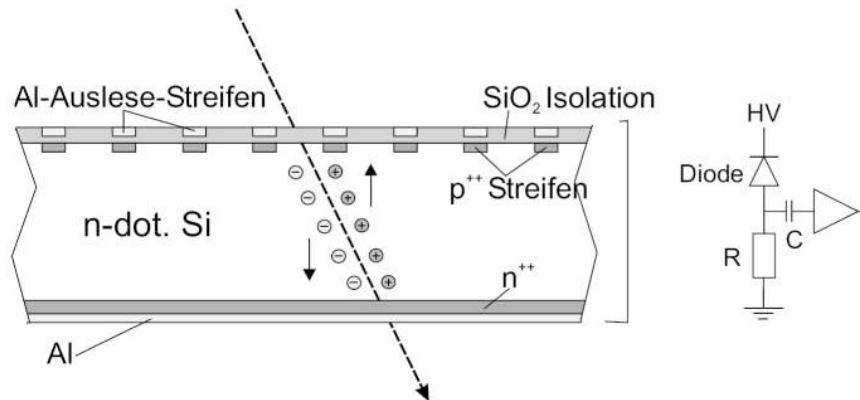


Abbildung 2.3.3: *Aufbau eines Siliziumsensors.*[Kra06]

Auf einem n-dotierten Siliziumwafer mit einer Dicke von gewöhnlich 0.3 bis 0.5 mm werden auf der Oberseite stark p-dotierte (p^{++}) Streifen implantiert. Auf der Unterseite befindet sich eine Schicht, welche stärker n-dotiert (n^{++}) ist als das Substrat selbst. Über den p^{++} Streifen befindet sich eine elektrisch isolierende SiO_2 Schicht, auf welche wiederum Aluminiumstreifen direkt überhalb der p^{++} Streifen aufgedampft sind. Auf diese Art koppeln Signale der p^{++} Streifen kapazitiv an die Aluminiumstreifen, welche ausgelesen werden. Auf der Unterseite ist auf die n^{++} Schicht eine dünne Aluminiumschicht aufgedampft, die zur Kontaktierung der n^{++} Schicht dient. Die p^{++} Streifen liegen an dem Minuspol der Hochspannung (Biasspannung), die Aluminiumschicht auf der Rückseite am Pluspol. Bewegt sich nun ein Teilchen durch den Sensor, so erzeugt es auf seinem Weg durch das Silizium Elektron-Loch-Paare. Es handelt sich dabei um freie Ladungsträger, die sich im elektrischen Feld innerhalb des Sensors bewegen können. Die Elektronen driften zum n-dotierten, die Löcher zum p-dotierten Bereich. Treffen die Löcher auf die Streifen, so erzeugt dies ein Signal, welches induktiv in die Aluminiumstreifen eingekoppelt wird. Von den Aluminiumstreifen wird das Signal zur Ausleseelektronik geleitet, wo es verstärkt und geformt wird. Durch diesen Sensoraufbau werden Gleichspannungsanteile von der Auslese- und Verstärkerelektronik ferngehalten und nur die Signale selbst registriert.

Je nach angelegter Biasspannung ist nicht die gesamte Dicke des Sensors aktiv, da sich die Verarmungszone vom p-n-Übergang aus ausbreitet. Bei kleinen Biasspannungen ist zunächst nur eine dünne Schicht des Sensors verarmt, weshalb auch nur diese zur Erzeugung des gewünschten Signals beiträgt. Die Elektron-Loch-Paare welche, im nicht verarmten Bereich erzeugt werden, rekombinieren sofort mit den dort vorhandenen Ladungsträgern und können daher nicht ausgelesen werden. Erhöht man die Spannung, so breitet sich die Verarmungszone

immer weiter aus, bis sie schließlich bei der Depletionsspannung den gesamten Sensor ausfüllt. Man ist stets bemüht einen Siliziumsensor im voll depletierten Bereich zu betreiben, da ein durchtretendes Teilchen so das größte Signal erzeugt. Die Depletionsspannung stellt daher eine wichtige Größe eines Siliziumsensors dar und sollte daher stets genau bekannt sein. Um die Depletionsspannung experimentell zu bestimmen, wendet man eine Kapazitätsmessung an. Den Sensor kann man sich dabei als eine Art Plattenkondensator mit variablem Plattenabstand vorstellen, in dem sich ein Dielektrikum befindet. Dieses Dielektrikum ist die ladungsträgerverarmte Schicht innerhalb des Sensors. Je nach angelegter äußerer Spannung variiert die Dicke dieser Schicht, so dass die Kapazität mit höherer Spannung abnimmt und mit Erreichen der Depletionsspannung konstant bleibt. Die Biasspannung sorgt aber nicht nur für ein Verarmen des Sensorvolumens, sondern auch für den thermisch generierten Leckstrom, welcher im Interesse einer kleinen Leistungsaufnahme, einem kleinen Rauschen und einer einfachen Kühlung möglichst niedrig gehalten werden sollte. Dies lässt sich durch eine schwache Dotierung des Sensors erreichen.

2.4 Wechselwirkung der Strahlung mit Silizium

Je nachdem was für eine Art von Teilchen den Sensor passiert, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Wechselwirkung. Teilchen die elektrisch geladen sind, können mit der Elektronenhülle der Siliziumatome oder auch mit dem Kern wechselwirken. Ferner können alle stark wechselwirkenden Teilchen durch Stöße mit den Atomkernen des Sensormaterials für eine Energiedeposition sorgen. Um den Energieverlust beim Durchgang durch den Sensor zu bestimmen, kann man bei elektromagnetisch wechselwirkenden Teilchen die Bethe-Bloch-Gleichung zur Hilfe heranziehen. Sie gibt den Energieverlust pro Strecke durch Anregung oder Ionisation an.

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{Zz}{M_A \beta} \left(\ln \left[\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{\bar{I}} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \right) \quad (2.9)$$

Hierbei steht m_e für die Ruhemasse des Elektrons, β ist die Geschwindigkeit in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit und z die Ladungszahl des einfallenden Teilchens. Z ist die Ordnungszahl und M_A die molare Masse des Sensormaterials. Der Elektronenradius wird mit r_e bezeichnet, γ steht für den Lorentzfaktor und \bar{I} für die mittlere Ionisationsenergie.

Da man in einem Spurdetektor möglichst alle durchtretenden Teilchen, im ganzen auftretenden Energiebereich, registrieren und vermessen will, muss der Sensor und die dazugehörige Ausleseelektronik so ausgelegt sein, dass auch die am wenigsten Energie deponierenden Teilchen (MIPs) registriert werden können. MIP steht für Minimum Ionizing Particle und beschreibt ein

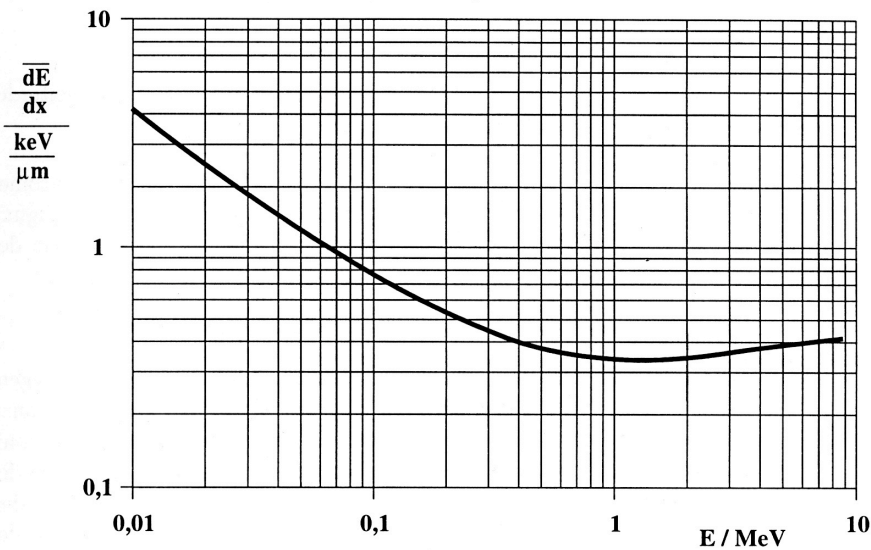


Abbildung 2.4.4: Die Bethe-Bloch Kurve gibt den Energieverlust eines Elektrons beim Durchgang durch Silizium an.[Fur06]

Teilchen, dessen Energieverlust pro Strecke am kleinsten ist. Das heißt, ein Teilchen, das eine Energie hat, die im Minimum der Bethe-Bloch Kurve liegt (siehe Abbildung 2.4.4).

Mittels eines Silizium-Sensors können jedoch nicht nur elektrisch geladene Teilchen gemessen werden, da zum Beispiel ein Photon, welches auf Materie trifft, ebenfalls ein geladenes Teilchen (Elektron) produzieren kann. Die Wahrscheinlichkeit für solch eine Wechselwirkung eines Photons mit dem Silizium des Sensors ist jedoch klein, da der Sensor nur eine geringe Dicke aufweist und somit wenig Material bietet. Da ein Silizium-Sensor jedoch in gewissem Maße immer eine Infrastruktur um sich herum benötigt, kann durch dieses zusätzliche Material die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit stark erhöht werden, was meist zu unerwünschten Effekten führt. Es kommen drei verschiedene Arten der Wechselwirkung in Frage.

Bei dem Photoeffekt schlägt ein einfallendes Photon ein Elektron aus der Elektronenhülle eines Targetatoms (Sensor oder Infrastruktur) und gibt seine Energie an dieses ab. Dieses sekundäre Elektron deponiert wiederum nach Bethe-Bloch Energie im umgebenden Material. Der Photoeffekt tritt bevorzugt bei kleiner Photonenenergie und großer Ladungszahl des Detektormaterials auf.

Mittlere Photonenenergien und kleine Werte der Ladungszahl begünstigen eher das Auftreten des Comptoneffekts, bei welchem ein Photon elastisch mit ei-

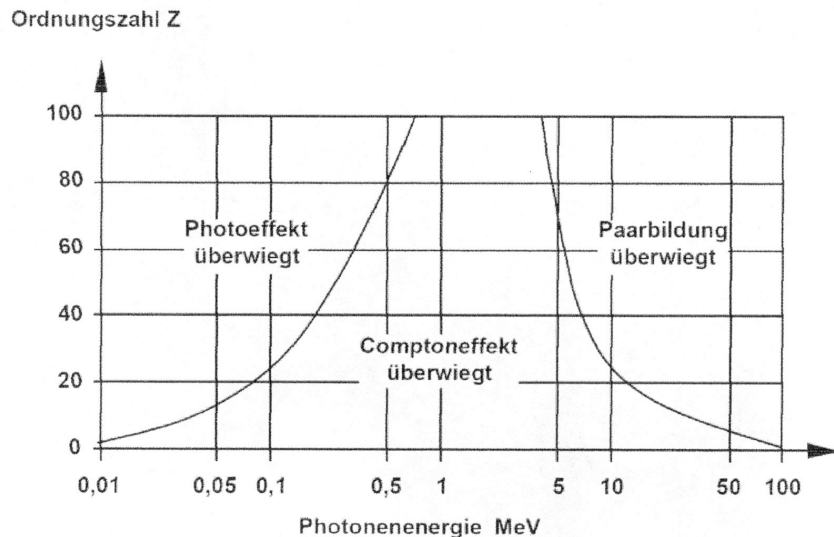


Abbildung 2.4.5: Je nach Energiebereich und Ladungszahl weisen Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung sehr unterschiedliche Wirkungsquerschnitte auf. [Kra06]

nem Elektron der äußeren Schale eines Atoms, welches sich näherungsweise als frei betrachten lässt, stößt. Das Photon wird dabei von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt und gibt einen Teil seiner Energie an das Elektron ab. Dieses Elektron verhält sich nun wieder wie von Bethe-Bloch beschrieben. Das abgelenkte Photon steht für weitere Effekte wie zum Beispiel dem Photoeffekt zur Verfügung.

Bei hoher Photonenenergie und großen Ladungszahlen ist das Auftreten der Paarbildung am wahrscheinlichsten. Dabei wird aus dem einfallenden Photon im Feld eines Atomkerns ein Elektron-Positron (e^+e^-)-Paar erzeugt. Dieser Effekt kann nur im Feld eines Atoms stattfinden, da ohne einen weiteren Stoßpartner, der Energie und Impuls aufnehmen kann, keine Möglichkeit besteht, die Energie- und Impulserhaltung gleichzeitig zu erfüllen. Die Mindestenergie des Photons muss dabei etwa $1,02\text{MeV}$ betragen, also der Summe der Ruheenergien von Elektron und Positron. Bei den hohen, von dem LHC erreichbaren, Energien ist dies eine wahrscheinliche Wechselwirkung von Photonen im Silizium-Streifen-Detektor. Je nach Menge des verwendeten Materials im Detektor kann dies dazu führen, dass sich die Anzahl der elektrisch geladenen Teilchen im Detektor stark erhöht, was im CMS-Tracker nicht erwünscht ist und die Detektorperformance verschlechtert. Nur durch weniger Material im Detektor kann dieser Effekt verhindert, beziehungsweise reduziert werden.

2.5 Strahlungsschäden

Der CMS-Tracker wird im Laufe seines Lebens einer sehr hohen akkumulierten Strahlendosis ausgesetzt sein. Bei einem Upgrade von LHC wird sich die Luminosität und damit die Strahlungsbelastung des Trackers um etwa einen Faktor 10 erhöhen. Dies ist zu viel für den jetzigen Tracker, der eine solche Belastung nicht lange überstehen würde. Die verursachten Schäden im Sensormaterial führen allgemein zu einem Ansteigen des Leckstroms und damit zu einem höheren Rauschen sowie zu einer Verringerung des erhaltenen Signals. Diese Effekte können so weit ansteigen, dass die Verlustleistung des Detektors zu groß wird und er nicht mehr gekühlt werden kann. Eine zweite Möglichkeit des Versagens ist eine stetige Verringerung des Signals, bis es durch die Ausselekttronik nicht mehr vom Rauschen separiert werden kann. Es ist daher von großem Interesse, die Mechanismen, die zu einer Zerstörung des Sensormaterials oder zumindest für eine Verschlechterung der Signalqualität führen, zu verstehen und diese durch geeignete Maßnahmen zu unterdrücken oder zu verringern.

Um experimentelle Ergebnisse zur Strahlungsschädigung vergleichen zu können, wird die Strahlendosis auf Neutronen mit einer Energie von 1 MeV normiert. Bei dem CMS-Detektor wird eine integrierte Dosis von 10^{15} Neutronen pro cm^2 am Ende der Betriebsdauer erwartet. Dieser Wert wird dann auf etwa 10^{16} Neutronen/ cm^2 bei einem zukünftigen Update des LHC ansteigen, wenn man die gleiche Betriebsdauer zugrunde legt.

Je nach Art der Wechselwirkung der Strahlung mit dem Sensor kommt es zu unterschiedlichen Strahlungsschädigungen. Diese Schädigungen können sich vollkommen unterschiedlich auf den weiteren Betrieb des Detektors auswirken. Wird im Sensormaterial lediglich eine Ionisationsspur durch ein hindurchtretendes, geladenes Teilchen erzeugt, so ist diese Schädigung vollständig reversibel, da alle Atomkerne auf ihren Gitterplätzen verbleiben. Kommt es jedoch zu einer elastisch oder inelastischen Wechselwirkung mit einem Atomkern, so kann ein relativ großer Energie- und Impulsübertrag erfolgen, was dazu führt, dass der getroffene Kern von seinem Gitterplatz gestoßen wird und sogar weitere auf seinem Weg befindliche Atomkerne von ihren Gitterplätzen stoßen kann. Eine einzige Wechselwirkung der Strahlung mit einem Siliziumkern kann auf diese Art sehr viele Siliziumatome von ihren Gitterplätzen entfernen. Diese Gitterdefekte führen zu anderen physikalischen Eigenschaften des Sensors, was einer dauerhaften Schädigung gleichkommt. Als Maß für die Stärke der Schädigung wird die NIEL (**N**on **I**onizing **E**nergy **L**oss) verwendet. Sie besagt, dass die Schädigung linear mit dem nicht ionisierenden Energieverlust zunimmt. Um die Größe der Schädigung verschiedener Teilchen und unterschiedlicher Ener-

gien zu vergleichen, bedient man sich der Schädigungsfunktion.

$$D(E) = \sum_k \sigma_k(E) \int_0^{E_R^{max}} f_k(E, E_R) \cdot P(E_R) \cdot d(E_R) \quad (2.10)$$

Dabei steht σ_k für den Wirkungsquerschnitt, f_k gibt die Wahrscheinlichkeit eines Stoßes eines Teilchens mit der Energie E und dem Energieübertrag auf den Stoßpartner E_R an. P steht für die Lindhardverteilung. Da die Größe der Schädigung bei unterschiedlichen Teilchen und unterschiedlichen Energien sehr verschieden ausfällt, bezieht man die Fluenz ϕ der schädigenden Teilchen auf Neutronen mit einer Energie von 1 MeV. Dies geschieht mittels des Härtefaktors.

$$\kappa = \frac{\int D(E) \phi(E) dE}{\int D_{Neutron}(E = 1 \text{ MeV}) \phi(E) dE} \quad (2.11)$$

Mit dem Härtefaktor kann nun jede Fluenz von Teilchen mit einer bestimmten Energie beziehungsweise Energieverteilung auf die Fluenz von Neutronen mit 1 MeV umgerechnet werden. Diese Neutronenfluenz würde die gleiche Schädigung verursachen und wird daher auch als Äquivalentfluenz ϕ_{eq} bezeichnet.

$$\phi_{eq} = \kappa \cdot \int \phi(E) dE \quad (2.12)$$

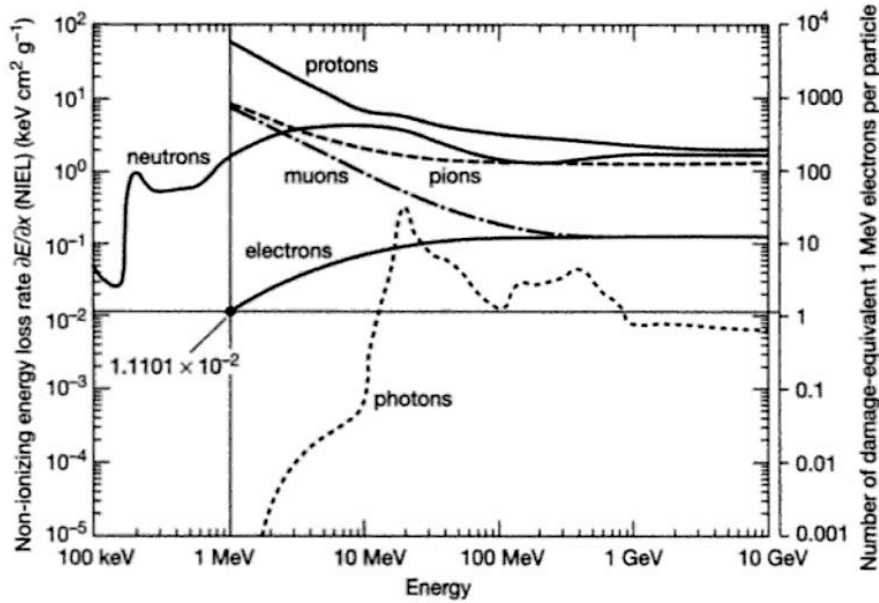


Abbildung 2.5.6: Niel-Diagramm: Energieverlust verschiedener Teilchen in Abhängigkeit der Energie für Silizium.[HSA02]

In Abbildung 2.5.6 ist der Energieverlust verschiedener Teilchen in Silizium zu sehen. Nach der NIEL-Hypothese entspricht dies gleichzeitig auch der Größe der Strahlenschäden.

Generell muss man zwischen verschiedenen Schädigungsarten unterscheiden. Solche, die sich direkt an der Oberfläche des Sensors befinden und Schädigungen im Sensorvolumen. Von Oberflächendefekten spricht man, wenn ein bei der Ionisation erzeugtes Loch in der Siliziumoxidschicht gefangen wird oder an der Übergangsstelle zwischen Siliziumoxid und Silizium dazu führt, dass neue elektronische Oberflächenzustände entstehen. Beides führt dazu, dass sich der Widerstand zwischen den Streifen verringert und die Kapazität dazwischen vergrößert. Ein zu geringer Widerstand zwischen den Streifen führt dazu, dass sich das Signal eines Teilchens auf mehrere Streifen verteilt, was wiederum zu einer verringerten Ortsauflösung führt. Der Anstieg der Zwischenstreifenkapazität resultiert in einem vergrößerten Rauschen. Oberflächendefekte lassen sich nicht vermeiden; jedoch kann ihnen durch ein geschickt gewähltes Sensordesign begegnet werden, so dass sie im Detektor nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Bei einem Volumendefekt wird, wie bereits beschrieben, ein Siliziumatom aus seinem Gitterplatz entfernt. Die dazu nötige Energie beträgt etwa 25eV. Da der Energieübertrag durch ein primäres Teilchen um Größenordnungen höher als die Atombindungsenergie im Siliziumkristall sein kann, ist es möglich, dass ein getroffenes Siliziumatom sehr viele weitere Atome aus ihren Gitterplätzen stößt. Dies führt dann zu vielen räumlich eng zusammenliegenden Fehlstellen und wird als Cluster bezeichnet. Bei einer zunehmenden Konzentration an Fehlstellen im Gitter wird es immer wahrscheinlicher, dass ein Zwischengitteratom durch Diffusion wieder auf einen regulären Gitterplatz zurückfindet. Auf diese Art werden etwa 90% der zunächst erzeugten Gitterfehler ausgeheilt. Jeder Fehler im Kristallgitter führt zu einer Veränderung der Bandstruktur. Es ist möglich, dass sich neue Zustände innerhalb der Bandlücke bilden, was zum einen die Leitfähigkeit erhöht, zum anderen zu einem Einfang, der durch Ionisation erzeugten Ladungsträger (Trapping), führen kann. Dies führt wiederum zu einer Verringerung der Signalthöhe. Außerdem wirken Defekte wie Akzeptoren, so dass sich die effektive Dotierungskonzentration mit der Zeit verändern kann. Ein n-dotierter Halbleiter wird durch Bestrahlung seine effektive Dotierungskonzentration immer weit verringern, bis schließlich irgendwann die Akzeptoren überwiegen und der Sensor effektiv p-dotiert wird.

2.6 Übersicht strahlungsinduzierter Schädigungen

Um einen sicheren Betrieb eines Detektors über die gesamte geplante Laufzeit gewährleisten zu können, müssen die makroskopischen Auswirkungen der Bestrahlung auf den Siliziumsensor bekannt sein. Nur so kann sichergestellt

werden, dass die komplette Infrastruktur, die zum Auslesen eines Siliziumsensors benötigt wird, die gewünschten Anforderungen erfüllen kann. Dies betrifft im Speziellen die maximal benötigte Kühlleistung sowie die Eigenschaften der Ausleseelektronik, aber auch viele weitere Systeme.

- **Leckstrom:**

Durch Bestrahlung steigt der Leckstrom eines Siliziumsensors stark an. Der relative Anstieg erfolgt dabei näherungsweise linear zur Strahlungsdosis ϕ , der der Sensor ausgesetzt war.

$$\Delta I = \alpha \cdot \phi \quad (2.13)$$

α steht hierbei für eine materialspezifische Größe und hängt vom verwendeten Sensoraufbau, wie auch von den verwendeten Dotierkonzentrationen, ab. Durch gute Kühlung des Sensors kann der Leckstrom deutlich vermindert werden. Es gilt:

$$I \propto T^2 \cdot \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right) \quad (2.14)$$

Bei Silizium gilt etwa $E_A = 0,6\text{eV}$. Als Faustregel kann hier gelten, dass der Leckstrom bei einer Kühlung um 7K auf etwa die Hälfte reduziert wird. Diese starke Abhängigkeit des Leckstroms von der Temperatur führt dazu, dass es zu einem sogenannten thermal runaway kommen kann. Erhöht sich die Temperatur, so wird sich auch der Leckstrom vergrößern und damit wiederum die Wärmeleistung des Sensors. Wird der Sensor nicht rechtzeitig von der Stromversorgung getrennt, führt dieses Verhalten zu einem stetigen und immer schnelleren Temperaturanstieg und schließlich zum Defekt des Sensors. Dies kann im Dauerbetrieb nur durch ausreichende Kühlung verhindert werden. Auf der anderen Seite hat man durch die starke Abhängigkeit des Leckstroms von der Temperatur eine wirkungsvolle Regelungsmöglichkeit zur Senkung der Stromaufnahme eines Sensors in der Hand.

- **Dotierungsinversion:**

Wird ein n-dotierter Sensor bestrahlt, so wirken die dabei entstehenden Fehlstellen wie Akzeptorniveaus, was die Akzeptorkonzentration erhöht und somit die effektive Dotierung eines n-dotierten Sensors vermindert. Es gilt:

$$N_{eff} = n_D \cdot \exp(-c\phi) - n_A - \beta\phi \quad (2.15)$$

Dabei steht n_D und n_A für die ursprünglichen Dotierkonzentrationen, β und c sind Konstanten. Wird über den Punkt, bei dem sich der Sensor intrinsisch verhält, weiter hinaus bestrahlt, kommt es zur Typinversion. Nach erfolgter Typinversion kann ein Detektor nur noch im vollständig

verarmten Zustand betrieben werden, da ansonsten keine Weiterleitung des Signals zum Auslesestreifen erfolgen würde. Bei einem unbestrahlten p in n Sensor befindet sich der p-n-Übergang direkt am Streifen. Nach Typinversion liegt der p-n-Übergang jedoch auf der Rückseite, was zu Folge hat, dass bei einer nicht vollständigen Depletion der Streifen im nicht verarmten Bereich liegt.

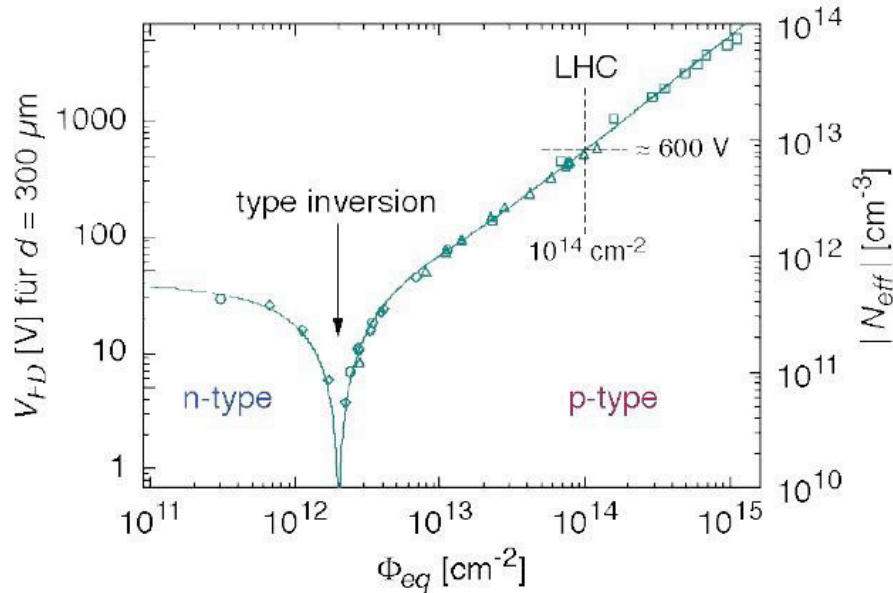


Abbildung 2.6.7: Effektive Dotierungskonzentration als Funktion des normierten Teilchenflusses. Mit zunehmendem Teilchenfluss und damit zunehmender Strahlenschädigung nimmt die effektive Dotierung eines n-dotierten Sensors zunächst ab um nach der Typinversion wieder zuzunehmen.[Han06]

- **Erhöhung der Depletionsspannung:**

Durch die Abhängigkeit der Depletionsspannung von der effektiven Dotierung sinkt die Verarmungsspannung zunächst ab um nach der Typinversion wieder anzusteigen. Bei zunehmender Strahlenbelastung muss die Spannung nach Typinversion immer weiter erhöht werden, was zum einen durch die Durchbruchsspannung und zum anderen durch die zunehmende Wärmeentwicklung begrenzt wird.

- **Nachlassen der Ladungsträgersammlungseffizienz:**

Die bei der Bestrahlung entstehenden Störstellen im Gitter führen dazu, dass nicht mehr alle durch Ionisation entstandenen Ladungsträger durch die Auslesestreifen abgesaugt werden können. Die Ladungsträger können durch die Störstellen gefangen werden (Trapping) und stehen somit nicht als Signal zur Verfügung. Eine weitere Möglichkeit ist die Rekombination der Ladungsträger an Störstellen, was ebenfalls zu einer Erniedrigung des

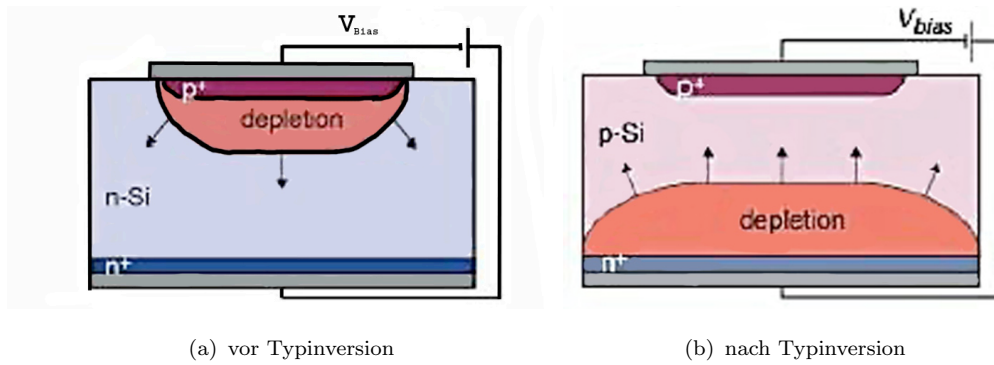


Abbildung 2.6.8: Ausbreitung des depletierten Bereiches vor und nach Typinversion. [Han06]

Signals führt. Die an den Störstellen gefangenen Ladungsträger bleiben jedoch nicht für immer gebunden. Dies würde nämlich zu einer Sättigung führen, bis keine neuen Ladungsträger mehr gebunden werden könnten und somit das volle Signal wieder zur Verfügung stünde. Vielmehr werden sie nach und nach wieder freigegeben und kommen somit deutlich zeitverzögert bei den Auslesestreifen an. Aufgrund der hohen Kollisionsfrequenz des LHC von 40Mhz ist eine Zuordnung zum jeweiligen Ereignis damit nicht mehr möglich und die Ladungsträgersammlungseffizienz sinkt ab.

2.7 Annealing

Wird die Bestrahlung eines Siliziumsensors gestoppt, zum Beispiel während eines Shutdowns des LHC, so kommt es zu einem teilweisen Ausheilen (Annealing) der Strahlungsschäden. Zu Beginn dominiert dabei das Beneficial Annealing, welches zu einer Verbesserung der Detektoreigenschaften führt. So vermindert sich beispielsweise der Leckstrom deutlich und auch der Prozess der Typinversion wird teilweise rückgängig gemacht. Diesem positiven Ausheilen ist jedoch ein zweiter, langsamer ablaufender Effekt überlagert, der nach Ende des Beneficial Annealing dominiert. Man spricht dabei von Reverse Annealing, da sich nun die Detektoreigenschaften wieder verschlechtern.

Am Beispiel des Reverse Annealings kann man auch wieder erkennen, wie wichtig eine zuverlässige und ausreichende Kühlung des Detektors ist. Der Prozess des Reverse Annealings läuft mit einer sehr stark temperaturabhängigen Geschwindigkeit ab und kommt bei hinreichend tiefen Temperaturen (etwa -5C) fast vollständig zum Stillstand. Es ist also von größter Wichtigkeit eine dauerhafte und ausreichende Kühlung des Detektors aufrecht zu erhalten, nachdem dieser das erste Mal Strahlungsschäden erlitten hat. Nur so kann der negative Einfluss des Reverse Annealings verhindert werden.

3 Kühlung und Stromversorgung des CMS-Trackers

3.1 Aufbau des CMS-Trackers

Der CMS-Tracker gliedert sich in zwei Bereiche. Im Inneren befindet sich der Pixeldetektor an den sich der Siliziumstreifendetektor nach außen hin anschließt. Der Pixeldetektor ist in einem engen Bereich um die Beampipe angeordnet und erstreckt sich bis zu einem maximalen Radius von etwa 15cm. Der räumlich viel größere Siliziumstreifendetektor (SST) hat eine Länge von etwa 5,5m und erstreckt sich in einem Radiusbereich von 22cm bis 110cm von der Beampipe. Er besteht aus 24244 einzelnen Siliziumsensoren, die zu 15148 Modulen angeordnet sind, welche eine aktive Fläche von 208 m² bedecken und zusammen etwa 9,3 Millionen Kanäle besitzen. Diese enorme Anzahl an Kanälen wird von dem viel kleineren Pixeldetektor mit etwa 45 Millionen Kanälen noch deutlich übertroffen. Der SST gliedert sich seinerseits in vier Sektionen wie in Abbildung 3.1.1 und 3.1.2 zu sehen ist. Die vier innersten konzentrischen Lagen bilden den TIB ("Tracker Inner Barrel"). Den äußeren, axialen Abschluss des TIB bildet die TID ("Tracker Inner Disk") Sektion. Nach außen folgt nun der TOB ("Tracker Outer Barrel"), welcher aus sechs Sensorlagen besteht. Auch der TOB besitzt einen axialen Abschluss welcher durch die TEC ("Tracker Endcap") gebildet wird. Die TEC besteht aus zwei Endkappen mit jeweils neun Scheiben (Disks).

3.2 Stromversorgung des CMS-Trackers

Jedes Detektormodul des CMS-Trackers benötigt drei verschiedene Spannungen. Eine Hochspannung von 0-600V für die Sensoren sowie 1,25V und 2,5V für die Ausleseelektronik. Ein einzelnes Modul hat dabei eine Stromaufnahme von 510mA - 750mA bei 2,5V sowie von 260mA - 390mA bei 1,25V. Die Unterschiede in der Stromaufnahme ergeben sich dadurch, dass es Module mit mehr oder weniger Kanälen gibt, die entsprechend mit sechs beziehungsweise vier Auslesechips (APV25) ausgestattet sind. Für alle Module des SST-Detektors zusammen führt dies zu einem Strombedarf von etwa 10000A bei 2,5V sowie weiteren 4700A bei 1,25V. Die Module sind gruppenweise in Detektor Power Groups zusammengefasst, von denen es 1944 Stück gibt. Jede Detektor Power Group teilt sich die Stromversorgung und Kühlung und ist auf einer eigenen

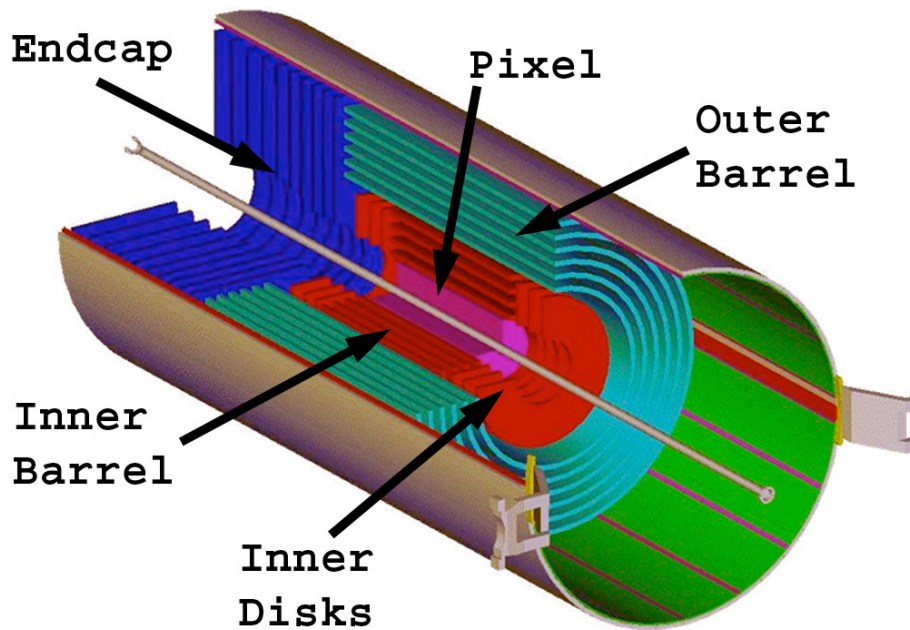


Abbildung 3.1.1: Schematische Ansicht des CMS Trackers. Von Innen nach Außen folgend: Inner Barrel, Inner Disk, Outer Barrel und Endcap.[Sgu]

mechanischen Struktur angeordnet. Für die Stromversorgung jeder Detektor Power Group steht eine PSU (Power Supply Unit) zu Verfügung, welche sowohl die beiden Niederspannungen als auch die Hochspannung bereit stellt. Von jeder Detektor Power Group muss also eine Kabelverbindung zur jeweiligen PSU bestehen, welche aufgrund der komplizierten Geometrie des Detektors beachtliche Längen (max. 50m) haben kann. Für diese Verkabelung außerhalb des CMS Detektors (etwa 40m) wurde ein spezielles LIC (**L**ow **I**mpedance **C**able) verwendet, welches entwickelt wurde, um bestmögliche Spannungsstabilität bei einer Schwankung der Stromstärke zu gewährleisten. Innerhalb des Detektors, wo es darauf ankommt das Materialbudget so niedrig wie möglich zu halten, kommt ein MSC (**M**ulti **S**ervice **C**able) aus Aluminium zum Einsatz. Durch diese langen Verbindungsleitungen kommt es zu größeren Spannungsabfällen bis maximal 4V in den Kabeln, welche durch separate Sensleitungen registriert und von den PSUs ausgeglichen werden müssen. Verbunden mit den Spannungsabfällen ist natürlich auch eine große Verlustleistung die in Form von Wärme anfällt. Außerhalb des Detektors ist dies kein großes Problem, da die entstehende Wärme relativ einfach an die Umgebung abgeführt werden kann. Da der Tracker jedoch ein hermetisch abgeschlossenes System ist, muss hier die Heizleistung der Kabel innerhalb des Trackers indirekt und aufwendig über die Kühlanlage abgeführt werden, um ein Ansteigen der Temperatur zu verhindern. Man hat es hier mit einem Zielkonflikt zu tun, da ein Verkleinern des Querschnitts zu einer erhöhten Heizleistung und damit zu einem massiveren Kühlsystem mit einem größeren Materialbudget führt. Umgekehrt eröffnet

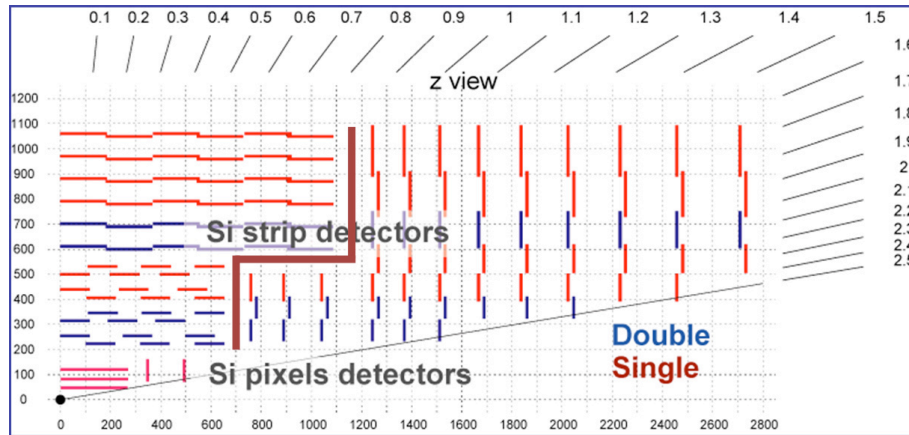


Abbildung 3.1.2: Schematische Seitenansicht des CMS Trackerquerschnitts. Von Innen nach Außen folgend: Inner Barrel, Inner Disk, Outer Barrel und Endcap.[Inc06]

eine Vergrößerung des Querschnitts den Einsatz eines leichteren Kühlsystems, erhöht aber direkt das Materialbudget durch die nun massiveren Kabel.

In Abbildung 3.2.3 ist die Verlustleistung, die als Wärme abgeführt wer-

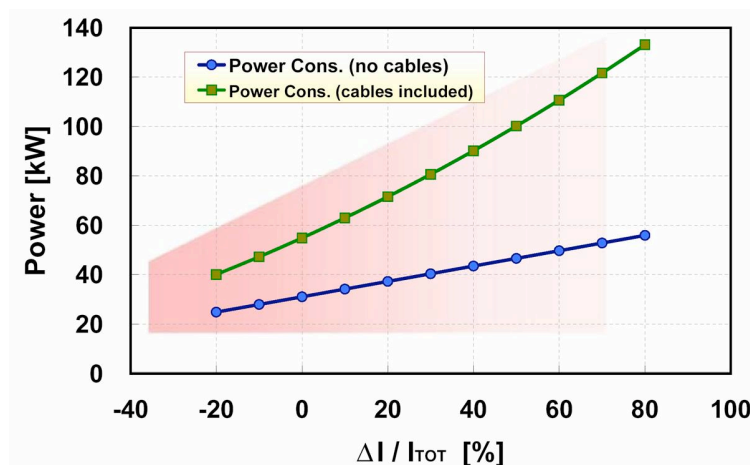


Abbildung 3.2.3: Verlustleistung ohne und mit 45m Kabellänge.[BAPP04]

den muss, mit und ohne Kabel, als Funktion der Stromstärke dargestellt. Als Nullpunkt der X-Achse ist dabei die typische Stromaufnahme $I_{TOT}=15000A$ gewählt. Bereits durch einen kleinen, relativen Anstieg der Stromstärke kommt es zu einem deutlichen Ansteigen der Verlustleistung. Außerdem führt eine Erhöhung der Stromstärke dazu, dass ein noch größerer Anteil der Gesamtleistung ungenutzt in eine Erwärmung der Kabel umgesetzt wird. Dies ist ein kritischer Punkt für ein Update des Trackers, bei dem sich eine Erhöhung der Stromaufnahme höchstwahrscheinlich nicht vermeiden lassen wird und die Kabel außerhalb des Detektors aller Voraussicht nach nicht ausgetauscht werden

können.

3.3 Kühlung des CMS-Trackers

Die Kühlkette des CMS-Trackers läuft über mehrere verschiedene Stufen. Zunächst wird von einer oberirdischen Anlage aus gekühltes Wasser mit einer Temperatur von etwa 6°C zur Verfügung gestellt, welches in die Kaverne gepumpt wird und dort zwei handelsüblichen R404A/R507A Kälteanlagen als Wärmesenke dient. Die doppelte Auslegung der Kälteanlagen ist durch die erhöhten Anforderungen an Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit begründet, die eine Detektorkühlung erfordert. Die Kälteanlagen befindet sich in Zone USC55 und haben eine Kälteleistung von je 74 Kilowatt. Mittels Wärmetauschern wird die Kälteleistung jeder Kältemaschine auf einen zweiten Kreislauf mit einer organischen Salzlösung (Brine) übertragen und von diesem über eine Strecke von 120 bis 150 Meter zur Zone UXC55 transportiert. An diesen Stellen befinden sich cooling racks, welche die Kälteleistung aufnehmen. Eine Besonderheit des Kältetransport ist bei dem ebenfalls doppelt vorhandenen Brine Kreisläufen gegeben, denn diese bestehen nicht etwa aus einem einfachen geschlossenen System, sondern sind in je zwei Unterkreisläufe gegliedert. Der erste Unterkreislauf transportiert das von der R404A/R507A gekühlte Brine in einen Reservoirtank, der somit ständig teilweise mit kaltem Brine gefüllt ist. Das Brinereservoir dient als Ausgleichsbehälter für durch Temperaturänderungen bedingte Volumenänderungen des Brine als auch als Kältereservoir. Ist das Brinereservoir einmal abgekühlt, so tritt der zweite Kreislauf in Aktion, welcher das Brine zu den beiden cooling racks transportiert. An diesen Stellen wird mittels weiterer Wärmetauscher abermals die Kälteleistung auf das flüssige C_6F_{14} übertragen. Dies wird schließlich als 1-Phasen Kühlmedium durch den Tracker gepumpt und führt die auftretende Wärmeleistung ab. Die C_6F_{14} Kühlleitungen haben eine Länge von bis zu 60m, so dass die gesamte Strecke, über die die Kälteleistung der Kältemaschinen in Zone USC55 bis zum Detektor transportiert werden muss, etwa 200 Meter beträgt. Abbildung 3.3.4 zeigt die räumliche Anordnung der einzelnen Komponenten. In Abbildung 3.3.5 ist der schematische Aufbau des Systems dargestellt.

3.4 Materialbudget des CMS-Trackers

Das Materialbudget des CMS-Trackers ist in bestimmten η -Bereichen zu großen Teilen durch das zur Kühlung und Stromversorgung benötigte Material bestimmt, wie man in Abbildung 3.4.6 sehen kann. Der starke Anstieg ist unter anderem in dem Aufbau des CMS-Trackers aus Barrels und Endkappen begründet. In Abbildung 3.1.2 ist in rot die treppenartige Struktur eingezeichnet,

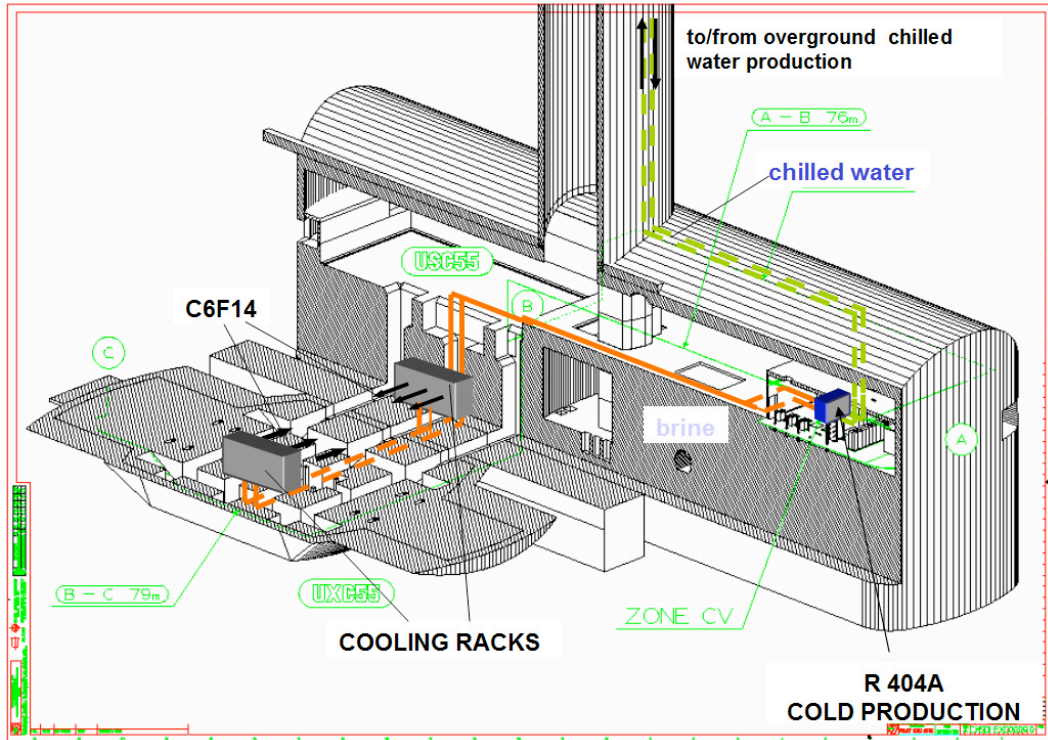


Abbildung 3.3.4: Position der einzelnen Kühlsystemkomponenten in der CMS-Kaverne. [Jes02]

die sich ergibt, wenn man die verschiedenen Barrel und Endkappensektionen zusammenfügt. Innerhalb dieses treppenartigen Bereiches verläuft ein Großteil der Stromversorgungskabel und Kühlleitungen. Tritt nun ein Teilchen in einem Bereich von etwa $1 < |\eta| < 2$ durch den Tracker, so muss es das Material der Stromkabel und Kühlleitungen durch diesen treppenartigen Aufbau mehrfach hintereinander passieren. Dies führt zu einem stark erhöhten Materialbudget in diesem η Bereich und sollte bei einem zukünftigen Update des Trackers nach Möglichkeit vermieden werden.

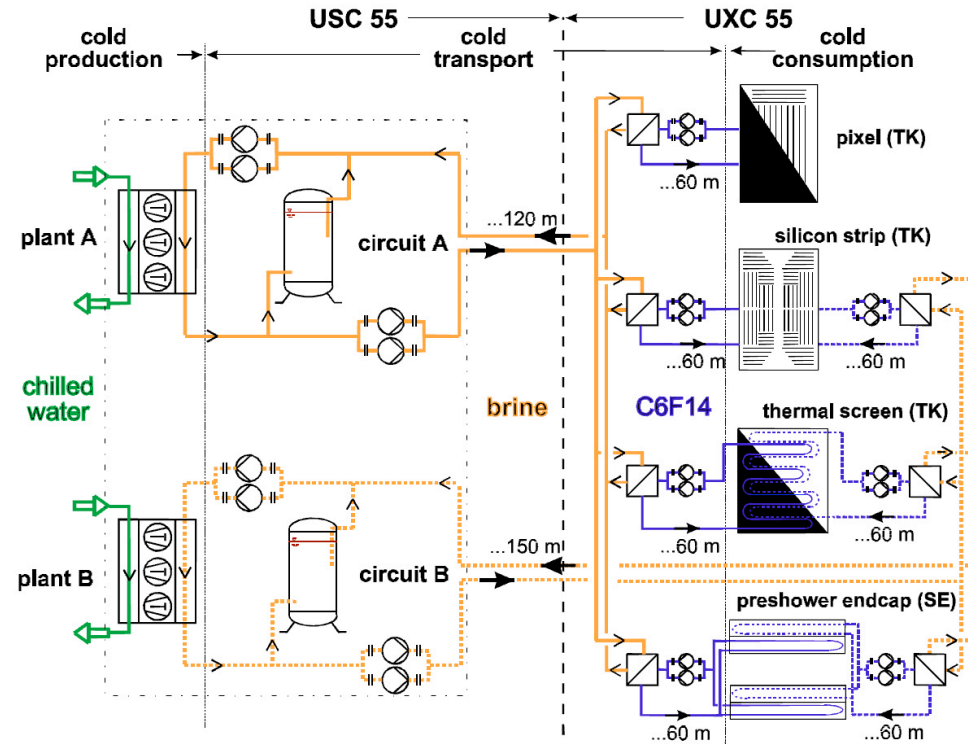


Abbildung 3.3.5: Schematischer Aufbau des CMS-Tracker Kühlsystems. [Jes02]

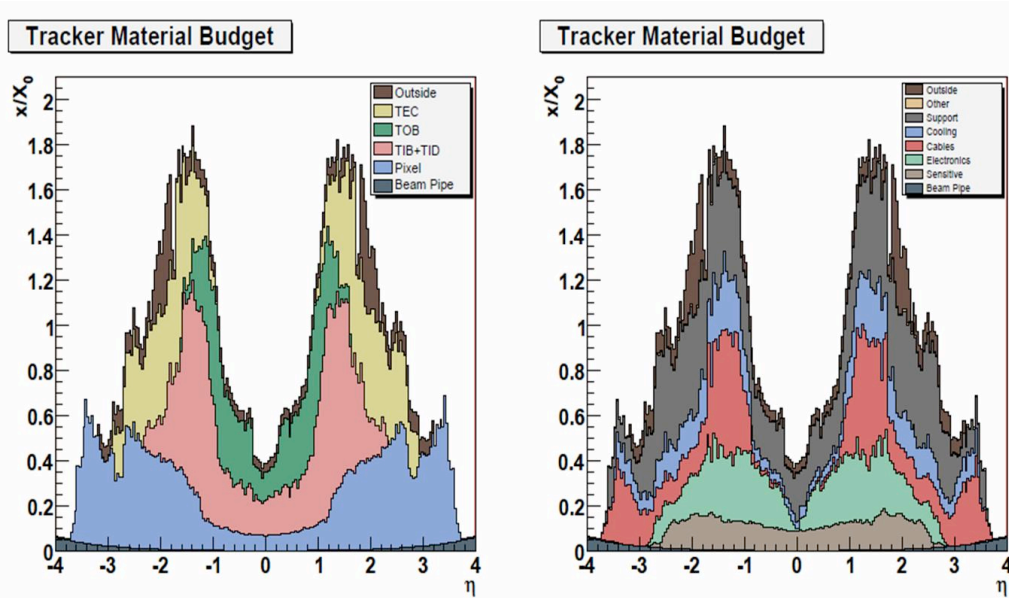


Abbildung 3.4.6: Materialbudget des CMS-Trackers. Auf der linken Seite ist das Materialbudget aufgeteilt in die einzelnen Subdetektoren des Trackers aufgetragen. Die rechte Seite zeigt die Aufteilung in verschiedene Materialkomponenten. [The08a]

4 CO₂ als 2-Phasen Kühlmedium

4.1 Vorteile von CO₂ als 2-Phasen Kühlmedium

Ein ideales 2-Phasen Kühlmedium zur Detektorkühlung sollte folgende Eigenschaften aufweisen. Es sollte eine sehr große Verdampfungsenthalpie besitzen, um möglichst wenig Kühlflüssigkeit durch den Detektor pumpen zu müssen. Außerdem sollte sich die Siedetemperatur bei sich änderndem Druck möglichst wenig ändern. Dies hat den Vorteil, dass an jedem von der Kühlung versorgten Punkt die gleiche Temperatur herrscht. Weiter sollte die Viskosität möglichst klein sein, um den unvermeidbaren Druckabfall möglichst gering zu halten und kleine Rohrquerschnitte verwenden zu können. Da ein 2-Phasen Kühlmedium zur Kühlung unweigerlich verdampfen muss, sollte der Volumenunterschied und somit der Dichteunterschied zwischen flüssiger und gasförmiger Phase möglichst gering ausfallen. So wird der Volumenstrom am Ende der Kühlleitungen und damit der Druckabfall nicht zu groß, was für eine näherungsweise konstante Temperatur im Detektor sorgt. Weiterhin ist es wichtig, die vom Kühlmedium zur Verfügung gestellte Kälteleistung auch auf das entsprechende Kühlröhrchen übertragen zu können. Dazu ist es wichtig ein Kühlmedium mit möglichst kleiner Oberflächenspannung zu haben. Je größer die Oberflächenspannung, desto früher kommt es zu einem kritischen Sieden. Kritisches Sieden beschreibt den Fall, dass an einem Punkt eigentlich noch genügend flüssiges Kühlmedium vorhanden wäre, dieses aber die Innenwand der Kühlröhrchen nicht mehr erreichen kann, da es durch eine Dampfschicht von dieser getrennt ist. Dieses Phänomen ist jedem bekannt, der schon einmal einen Wassertropfen auf eine heiße Herdplatte hat fallen lassen. Der Wassertropfen verdampft nicht schlagartig, sondern tanzt auf einer isolierenden Dampfschicht über die Herdplatte und bleibt verhältnismäßig lange in seiner flüssigen Phase.

CO₂ eignet sich in dieser Hinsicht optimal als 2-Phasen Kältemittel, da es bei den meisten Eigenschaften im Spitzenfeld rangiert und in keinem Bereich deutliche Schwächen aufweist. So hat es mit über 320kJ/kg (bei -40°C) eine deutlich größere Verdampfungsenthalpie als viele andere Kältemittel. Auch ist die sehr kleine Viskosität von CO₂ von großem Vorteil, so dass es möglich wird sehr dünne und lange Kühlröhrchen zu verwenden ohne einen zu großen Druckabfall und damit Temperaturabfall tolerieren zu müssen. Außerdem ist CO₂ nicht brennbar, in kleinen Dosen ungiftig, umweltfreundlich und im Vergleich zu anderen Kühlmitteln sehr günstig. Dieser Sachverhalt zeigt sich durch

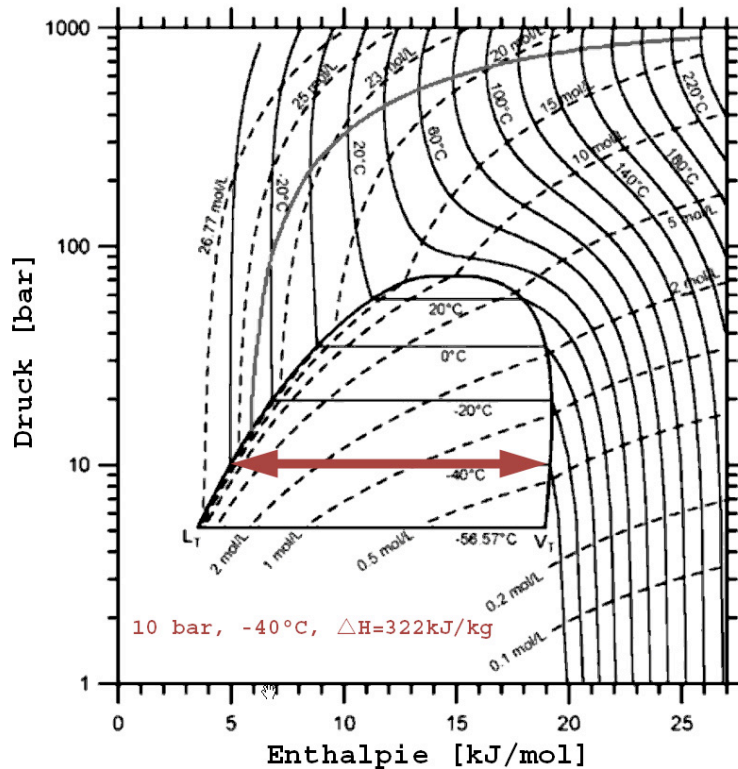


Abbildung 4.1.1: Enthalpie-Druck Diagramm von CO₂. Wie durch den Pfeil gekennzeichnet ist, besitzt CO₂ bei einem Druck von 10bar und einer Temperatur von -40° eine sehr große Verdampfungsenthalpie von 322 J/g, die mit abnehmendem Druck sogar noch weiter zunimmt. Die dicke durchgezogene Linie gibt die Sättigungskurven an, die dünneren Linien stehen für die Isothermen und die gestrichelten Linien geben die Isochoren an [Mar06].

einen Vergleich der physikalischen Eigenschaften von CO₂ und C₃F₈, welches zum Beispiel bei Atlas verwendet wird (Tabelle 4.1) eindrucksvoll. In diesem Vergleich fehlt das beim CMS-Tracker verwendete C₆F₁₄, da es sich dabei um eine Ein-Phasenkühlung handelt. Ein wichtiger thermodynamischer Wert für ein Kühlmittel, das zur Detektorkühlung eingesetzt werden soll, stellt die Größe der Siedetemperaturänderung die durch eine Druckänderung hervorgerufen wird, dar. Wie man in Tabelle 4.1 und Abbildung 4.1.3(a) sehen kann, ist sie mit etwa 1,8 °C für eine Druckänderung von 1 bar sehr klein. Dies ist zusammen mit der kleinen Viskosität der Grund, warum man mit CO₂ sehr lange und dünne Kühlleitungen verwenden kann. Ein weiterer wichtiger Vorteil den CO₂ bietet, ist das relativ große Verhältnis zwischen Dampf- und Flüssigkeitsdichte. Diese Tatsache stellt sicher, dass der Druck in einem Kühlröhrchen nicht zu stark abfällt, wenn es gegen Ende immer mehr Dampf und immer weniger Flüssigkeit enthält und damit einen größeren Volumenstrom transportieren muss. Ein Blick auf Abbildung 4.1.3 zeigt, dass CO₂ auch bei der Viskosität, im besonderen Maße aber bei der Verdampfungsenthalpie

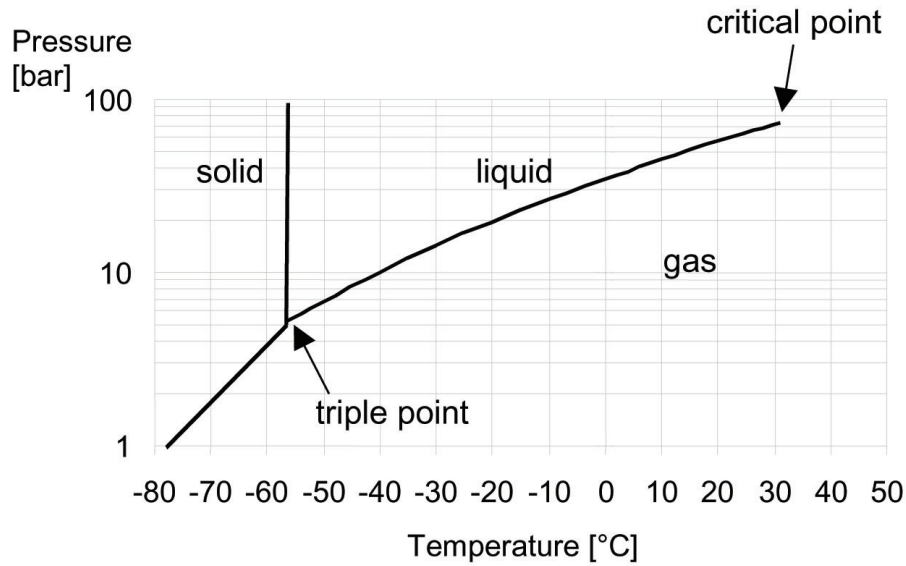


Abbildung 4.1.2: Phasendiagramm von CO₂ [PRDFL99]

	C ₃ F ₈	CO ₂
P (Dampfdruck)	1.7 bar	17 bar
ΔT für $\Delta P = \pm 0.1 \text{ bar}$	+1.4 C / -1.5 C	+0.2 C / -0.2 C
ΔT für $\Delta P = \pm 1.0 \text{ bar}$	+12 C / -20 C	+1.8 C / -1.9 C
Verdampfungsenthalpie	100 J/g	280 J/g
Massendurchfluss für 100 W	1.0 g/sec	0.4 g/sec
Volumendurchfluss für 100W	0.6 cm ³ /sec	0.4 cm ³ /sec

Tabelle 4.1: Thermodynamische Eigenschaften von C₃F₈ und CO₂

Bestwerte erzielt.

Der einzige Nachteil der sich durch die Verwendung von CO₂ ergibt, sind die Systemdrücke, die im Vergleich zu anderen 2-Phasen Kühlmedien deutlich größer sind, was bei der Auslegung einer Kühlanlage Berücksichtigung finden muss. Die auftretenden Drücke sind aber durchaus beherrschbar, so kommt CO₂ mittlerweile auch bei vielen kommerziellen Produkten zum Einsatz, wodurch bereits viele Standardteile und Fertigungstechniken kommerziell verfügbar und getestet sind.

Neben der Wahl von CO₂ als Kühlmedium müssen bei einer Kühlanlage noch viele weitere Parameter optimiert werden. Je nach verwendeten Querschnitten, Drücken und Durchflüssen, kommt es bei einer 2-Phasen Strömung zu ganz unterschiedlichen Strömungsverläufen. Dies kann dazu führen, dass die Druckabfälle zu groß oder der Wärmeübertrag auf die Kühlröhrchen zu klein wird. Es ist daher sinnvoll, zunächst die theoretischen fluiddynamischen Grundlagen

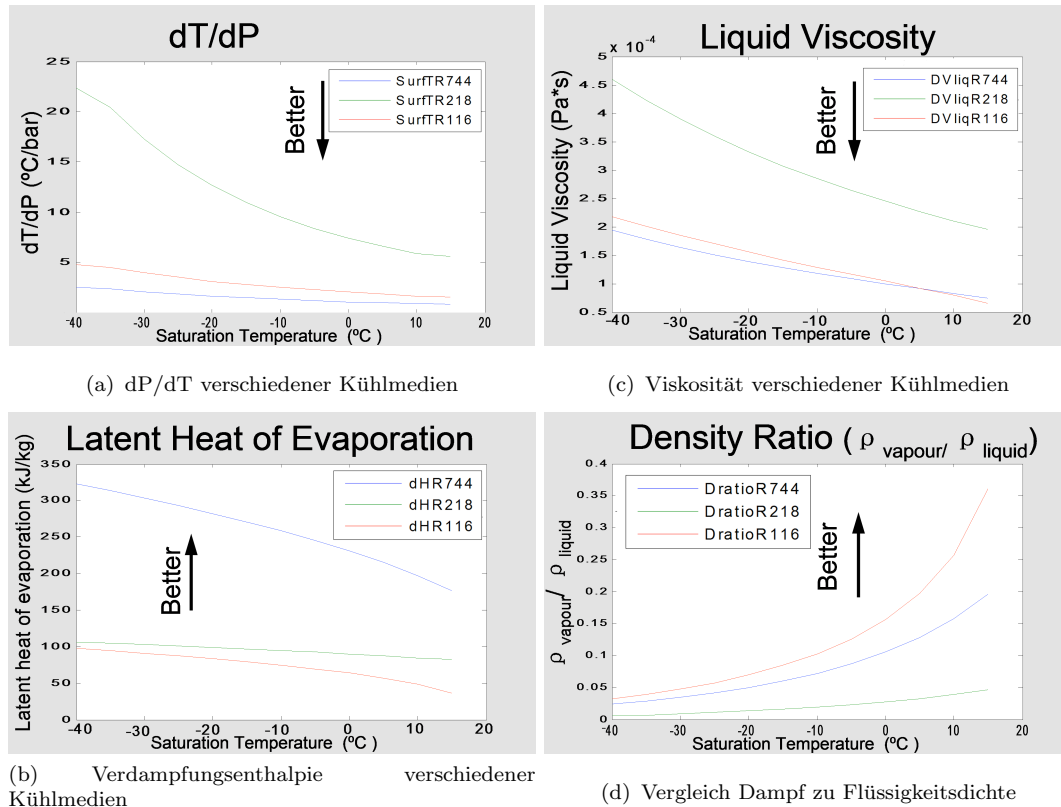


Abbildung 4.1.3: Vergleich der Eigenschaften von CO₂ mit anderen Kühlmedien. Bei dem in blau gezeichneten R744 handelt es sich um CO₂, R218 steht für Octafluorpropan und R116 für Hexafluorethan. [Ver08]

näher zu betrachten.

4.2 Fluiddynamische Grundlagen

Bei einer 2-Phasen Strömung mit zwei verschiedenen Medien (zum Beispiel Luft und Wasser) hat ein Wärmeeintrag in das System nur geringe Auswirkungen auf das Verhalten. Es ändern sich nur die temperaturabhängigen, physikalischen Eigenschaften der Medien. Im Gegensatz dazu, kommt es bei einem 2-Phasen System mit nur einem Medium (zum Beispiel CO₂) zu einem deutlich komplizierteren Verhalten. Durch Wärmeeintrag oder -abfuhr kommt es, zusätzlich zu den Änderungen der physikalischen Eigenschaften, durch Kondensation und Verdampfung, zu einem Massenaustausch zwischen den Phasen. Es ist daher nicht möglich die gleichen und weitaus einfacheren Modelle wie bei einer 2-Phasen Strömung mit verschiedenen Medien heranzuziehen. Obwohl eine 2-Phasen Strömung mit nur einem Medium allen fluiddynamischen Gesetzen gehorcht, ist die Anwendung doch ungleich schwieriger als bei einer 1-Phasen Strömung des gleichen Mediums, da die Effekte der Massenträgheit,

der Viskosität und des Auftriebs (Gasblase in Flüssigkeit) auf beide Phasen angewendet werden müssen. Zusätzlich kommt es je nach lokaler Zusammensetzung und Anordnung der Phasen zu unterschiedlichen Einflüssen auf die Oberflächenspannung.[A.A01]

Werden in einer 2-Phasen Strömung Flüssigkeit und Gas gemeinsam durch eine Leitung geschickt, so ist zunächst einmal unbekannt, an welchen Stellen des Rohrquerschnitts sich Flüssigkeit und Gas befinden, wie also die Verteilung von Flüssigkeit und Gas aussieht. Durch die hydrodynamischen Effekte untereinander kann es zu vollkommen verschiedenen lokalen Verteilungen kommen. Wird dem Röhrchen Entropie zugeführt oder entzogen, so hat auch dies großen Einfluss auf die Strömungstopologie. Diese Veränderungen verursachen wiederum Unterschiede im lokalen Wärmeübertrag und können so auf die Größe des Wärmeeintrags oder -austrags zurückwirken. Die Strömung verändert sich über die ganze Länge der Leitungen in ihren thermischen und hydraulischen Eigenschaften, so dass die Strömungstopologie an keiner Stelle rein thermisch oder rein hydrodynamisch bestimmt werden kann. Durch dieses äußerst komplizierte Verhalten ist es bisher nicht exakt möglich eine 2-Phasen Strömung eines Mediums korrekt zu simulieren und die Verhaltensweise vorauszusagen. Man ist daher auf mehr oder weniger empirische Gesetzmäßigkeiten angewiesen.

Die Verhältnisse in einem senkrechten Rohr, welches gleichzeitig von 2-Phasen, von unten nach oben, durchströmt wird und das thermisch isoliert ist, können in fünf verschiedene Strömungstopologien unterteilt werden. Solche Verhältnisse würden beispielsweise bei der Rückführung von CO_2 aus dem Tracker auftreten. Die Strömungstopologien zeigen teils Überschneidungen und fließende Übergänge. Außerdem ist es nicht immer leicht diese zu unterscheiden, da es sich bei der Einteilung stellenweise um ein subjektives Urteil handelt. Die fünf Topologien sind: [CT96]

- **Bubbly Flow**

Bei dem Bubbly Flow sind in der strömenden, zusammenhängenden, flüssigen Phase einzelne Gasblasen gleichmäßig verteilt. Die Gasblasen können dabei klein und kugelförmig sein, aber auch anwachsen und eine eher tropfenartige Form annehmen; die Blasengröße ist aber immer kleiner als der Durchmesser der Leitung. Mit größer werdenden Blasen nähert man sich dem Slug Flow an, so dass es zu Verwechslungen kommen kann.

- **Slug Flow**

Bei dem Slug Flow entspricht die Blasengröße etwa dem Rohrdurchmesser. Die Blasen sind dabei länglich und besitzen an ihrer Spitze eine charakteristische halbrunde Form. Die Länge der Blasen kann sehr unterschiedlich sein. Zwischen den einzelnen Blasen befindet sich Flüssigkeit, welche sich mit den Blasen bewegt und so für den Transport

von Flüssigkeit sorgt. Innerhalb dieser Flüssigkeit können sich ebenfalls kleinere Blasen befinden. Zwischen Gasblasen und Rohroberfläche bildet sich eine dünne Flüssigkeitsschicht, welche das Gas von der Oberfläche separiert und eine entgegengesetzte Strömungsrichtung besitzt, da es sich durch die Schwerkraft langsam von oben nach unten bewegt.

- **Churn Flow**

Brechen bei einem Slug Flow die Gasblasen zusammen, so kommt es zum Churn Flow. Dabei kommt es zu einem mehr oder weniger chaotischen Fließverhalten von Gas und Flüssigkeit. Der Großteil des Gases befindet sich in der Rohrmitte, die Flüssigkeit hingegen eher an der Rohroberfläche. Andere Bezeichnungen für Churn Flow sind **Semi-Annual** oder **Slug-Annual Flow**.

- **Wispy-Annual Flow**

Bei dem Wispy-Annual Flow kommt es zu einer relativ dicken Flüssigkeitsschicht an der Rohroberfläche. Die flüssige Phase befindet sich aber zusätzlich auch in der Rohrmitte, wo sie von Gas umgeben ist und formt dabei größere, zusammenhängende Tropfen, die eine lange, filamentartige Struktur annehmen. Das Gas ist zum Großteil in der Rohrmitte lokalisiert, wobei es aber auch kleinere Blasen innerhalb der Flüssigkeitsschicht an der Rohroberfläche gibt.

- **Annular Flow**

Bei dem Annular Flow befindet sich fast die gesamte flüssige Phase an der Rohroberfläche, das Gas hingegen in der Rohrmitte. An dem flüssigen Strömungsfilm an der Rohroberfläche kommt es zu größeren Wellenbewegungen, die, wenn sie zusammenbrechen, dafür sorgen, dass einige Tropfen in die Rohrmitte bewegt werden. Im Unterschied zum Wispy-Annual Flow sind diese Tropfen aber von einander separiert.

Aufnahmen dieser fünf verschiedenen Topologien sind in Abbildung 4.2.4 gezeigt. Dabei sind die schematischen Verhältnisse auf der oberen Bildhälfte, reale Fotografien in der unteren Bildhälfte dargestellt.

Die Verhältnisse verändern sich, wenn die Flussrichtung im Rohr nicht mehr senkrecht, sondern horizontal verläuft. Durch die nun unsymmetrisch auf den Rohrquerschnitt wirkende Gravitation kann es zu einer Ansammlung von Gas an der oberen Rohrwand kommen, welche somit relativ früh nicht mehr von kühlender Flüssigkeit benetzt sein kann. Infolge dessen kann es so zu einem lokalen Temperaturanstieg kommen. Abbildung 4.2.5 zeigt die Verhältnisse, wie sie bei einer beheizten, beziehungsweise gekühlten Leitung auftreten können. In Abbildung 4.2.5 (a) wird gezeigt, wie sich die Strömungstopologie in einem geheizten, horizontalen Rohr, welches von links nach rechts durchströmt wird, über die Länge verändert. Die Darstellung entspricht dabei einer

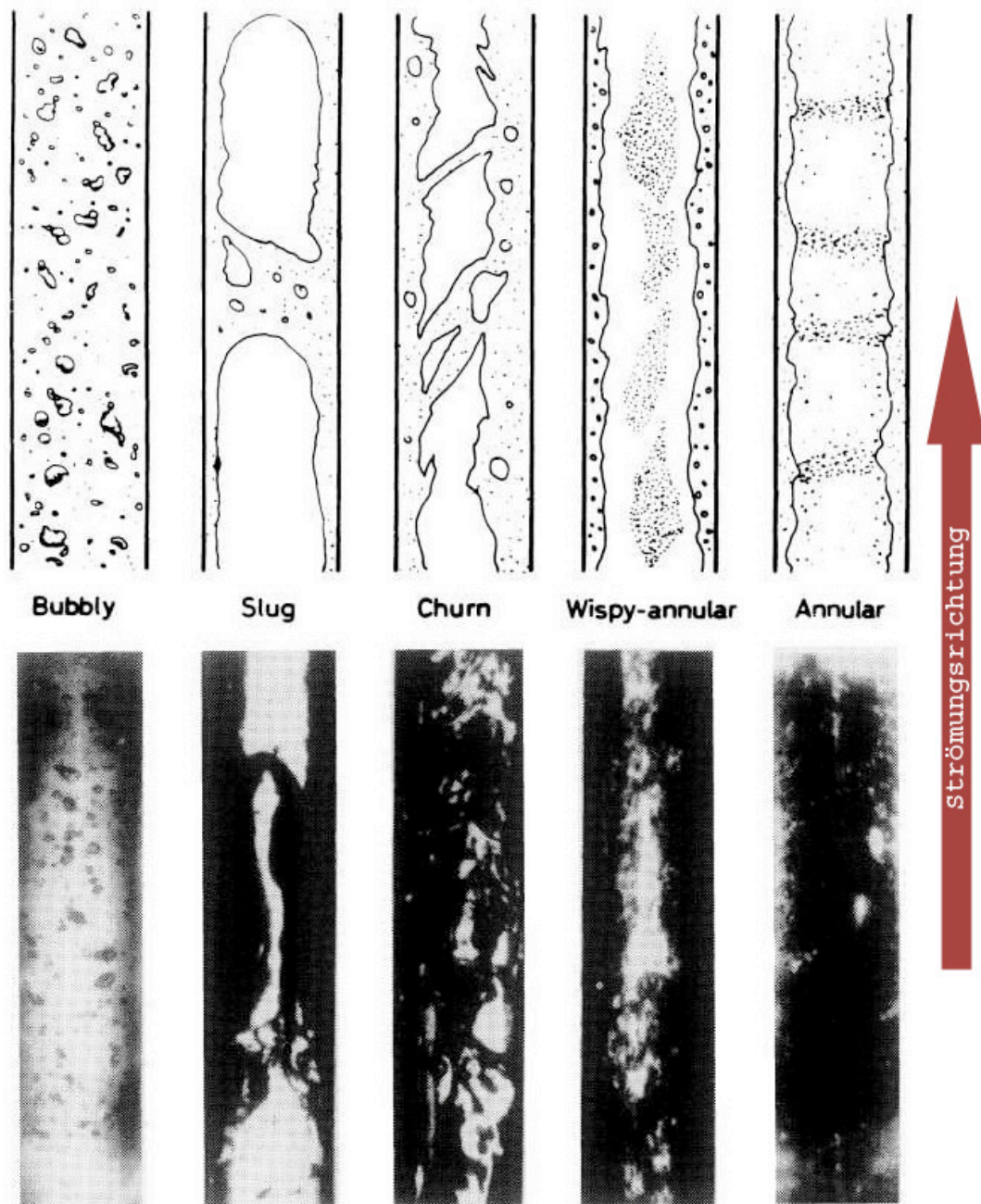


Abbildung 4.2.4: Übersicht über verschiedene Strömungstopologien wie sie bei einem thermisch isolierten senkrechten Rohr auftreten. Die Flussrichtung ist dabei von unten nach oben gewählt. [CT96]

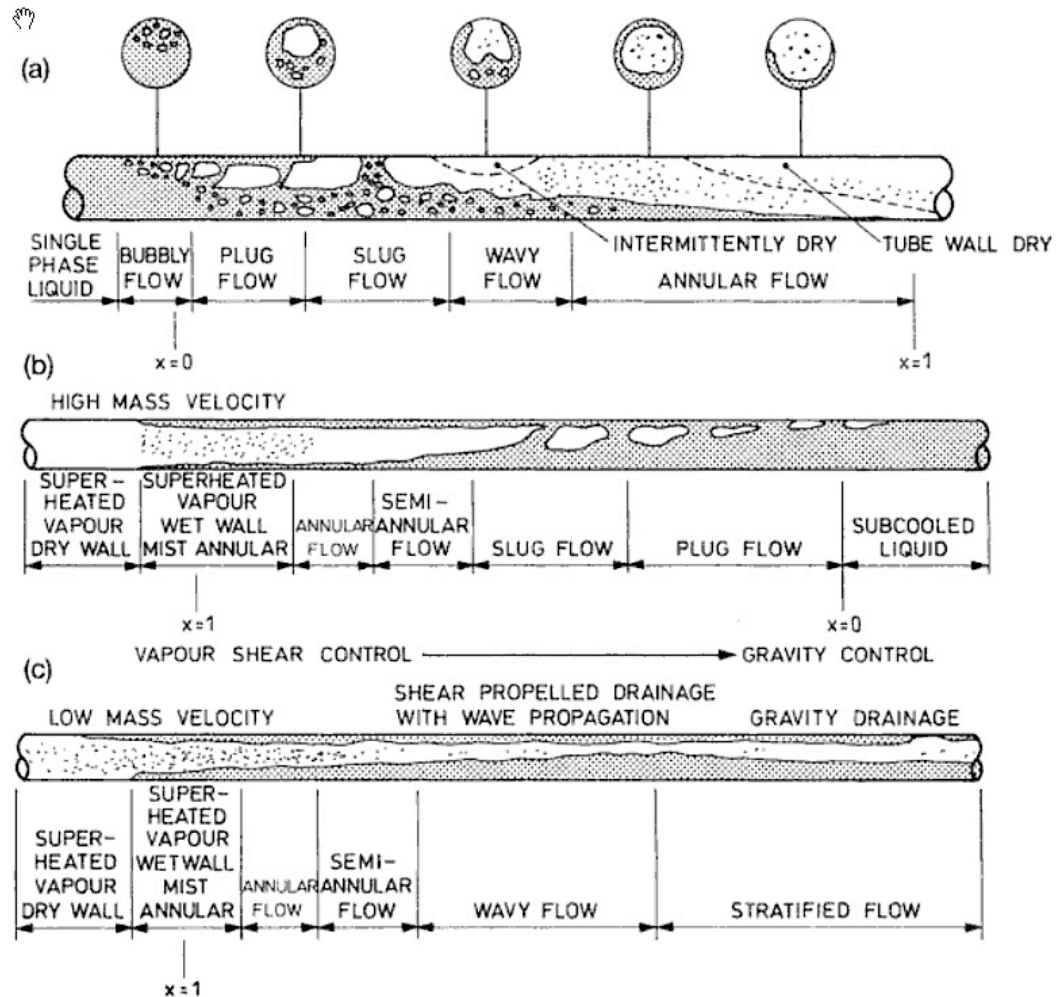


Abbildung 4.2.5: Übersicht über verschiedene schematische Strömungstopologien, wie sie bei einem beheizten beziehungsweise gekühlten Rohr auftreten können. Die Flussrichtung ist dabei von links nach rechts gewählt.[CT96]

relativ kleinen Strömungsgeschwindigkeit von $<1\text{m/s}$. Bei größer werdenden Geschwindigkeiten wird der Effekt der Gravitation immer kleiner, die Tendenz der flüssigen Phase, sich an der oberen Rohrrinnenfläche zu sammeln, wird geringer und die Verteilung von Flüssigkeit und Gasphase symmetrischer. Von links tritt reine Flüssigkeit direkt an der Phasengrenze in die beheizte Leitung ein. Durch den Eintrag von Entropie wird ein Teil der Flüssigkeit in die gasförmige Phase wechseln und kleine Gasblasen formen, die sich an der oberen Rohrrinnenseite sammeln. Bei der Strömungstopologie handelt es sich um den Bubbly Flow (siehe Abbildung 4.2.4). Mit größer werdendem Gasanteil kommt es zu einem Plug Flow. Dabei verbinden sich die, beim Bubbly Flow separierten, einzelnen Gasblasen zu größeren, unregelmäßig geformten Blasen, die sich an der oberen Rohrrinnenseite befinden. Zusätzlich gibt es noch einige kleinere, in der Flüssigkeit verteilte, Blasen. Die nächste Stufe ist der Slug Flow, bei dem sich die Blasen weiter vergrößern, jedoch durch die Wirkung der Gravitation nicht die Größe des Leitungsdurchmessers einnehmen. Bei dem Slug Flow ist auch die Oberseite der Leitung benetzt, jedoch befindet sich der weitaus dickere Flüssigkeitsfilm auf der Unterseite. Bei weiter zunehmendem Gasanteil kommt es zum Wavy Flow; dabei verbinden sich die großen, einzelnen Blasen zu einem zusammenhängenden Gasbereich und es kann an der Oberseite der Leitung zu einem ersten zeitweisen Dry Out kommen. Bei der letzten Flusstopologie, vor Verdampfung der gesamten Flüssigkeit, handelt es sich um den Annular Flow. Dabei bewegt sich die Flüssigkeit fast ausschließlich als Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche; nur einige kleinere Flüssigkeitstropfen befinden sich innerhalb der Gasphase. Dieser Film beginnt nun sich von oben nach unten aufzulösen, so dass die Fläche, der vom Dry Out betroffenen Rohrrinnenwand, immer weiter zunimmt, bis schließlich die gesamte Flüssigkeit verdampft ist.

Der umgekehrte Verlauf ist in Abbildung 4.2.5 b) und c) dargestellt. Hier tritt überhitzter Dampf von links in die gekühlte Leitung ein. Der Unterschied zwischen b) und c) liegt in der Flussrate, mit der das Gas in die Leitung eintritt. In Abbildung 4.2.5 b) tritt ein großer Massenstrom an Dampf in die Leitung ein, was es nach dessen Kondensation ermöglicht, die komplette Leitung mit Flüssigkeit zu füllen. Hierbei beschreibt die Strömung verschiedene Topologien, bis schließlich auf der rechten Seite 1-Phasen Flüssigkeitsströmung vorliegt. Ist der Gasfluss kleiner, so wird sich die Leitung nicht vollständig mit Flüssigkeit füllen. Es wird zu wenig Gas nachgeliefert, um den Abfluss der Flüssigkeit durch Kondensation zu kompensieren. Der Druck wird sich in diesem Fall so einstellen, dass er dem Dampfdruck der Flüssigkeit bei der entsprechenden Rohrtemperatur entspricht, während er in b) auch deutlich höher sein kann.

Jede der vielen Flusstopologien erfordert ihre eigene mathematische Modellierung. Außerdem muss auch der Übergang von einer Topologie zur nächsten modelliert werden, was nach wie vor nur sehr eingeschränkt, schwierig und ungenau möglich ist.

In erster Näherung ist es jedoch möglich den Druckabfall mittels eines homogenen Flüssigkeitsmodells zu bestimmen. Dabei werden Unterschiede, wie sie durch die verschiedenen Flusstopologien verursacht werden, natürlich nicht berücksichtigt.

Homogenes Flüssigkeitsmodell

Bei diesem Modell wird die 2-Phasen Strömung durch eine effektive Flüssigkeit ersetzt, welche aus den Eigenschaften von realer Flüssigkeit und Gas hervorgeht. Ein Druckabfall wird hier durch drei verschiedene Beiträge verursacht. Zum einen durch Reibung der Flüssigkeit an der Leitung, der Massenträgheit bei beschleunigtem Fluss sowie durch einen hydrostatischen Beitrag. Zusammen ergibt dies in Flussrichtung z :

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz} \right)_{hydrostatisch} + \left(\frac{dp}{dz} \right)_{Traegheit} + \left(\frac{dp}{dz} \right)_{Reibung} \quad (4.1)$$

Den ersten hydrostatischen Anteil des Gesamtdruckabfalls kann man schreiben als:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{hydrostatisch} = g_z \rho_H = g_z (\epsilon_{GA} \rho_G + (1 - \epsilon_{GA}) \rho_L) \quad (4.2)$$

g_z steht dabei für die Komponente der Schwerkraft in Flussrichtung (z -Richtung), $\rho_H = \epsilon_{GA} \rho_G + (1 - \epsilon_{GA}) \rho_L$ ist die effektive Dichte der Flüssigkeit. ϵ_{GA} steht für den gemittelten lokalen Volumenanteil des Gases und ρ_L und ρ_G für die Dichte von Flüssigkeit und Gas.

Für den durch die Massenträgheit verursachten Abfall gilt:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{Traegheit} = \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{A} \int_A \rho u^2 dA \right) = \dot{m}^2 \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{\rho_H} \right) \quad (4.3)$$

Hierbei steht \dot{m} für den gesamten Massenstrom pro Einheitsfläche in der Leitung.

Der Druckabfall, welcher durch die reibende Scherbewegung zwischen Flüssigkeit und Leitungsinnenfläche entsteht, ist der - in dieser Näherung - am wenigsten zuverlässig bestimmte Wert. Es gilt:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{Reibung} = \frac{2\tau_W}{R} \quad (4.4)$$

Dabei steht τ_W für die Scherspannung, die zwischen Flüssigkeit und Oberfläche entsteht und R ist der Radius der zu untersuchenden Leitung. Um den Druckabfall nun zu bestimmen, gibt es verschiedene weitere Näherungen.

- Reibungsfaktor:

Wie auch bei einem 1-Phasen System kann man einen Reibungsfaktor einführen. Dieser muss, um genaue Ergebnisse zu erhalten, je nach Zusammensetzung der einzelnen Phasen und der Flusstopologie angepasst werden.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{Reibung}} = \frac{f \dot{m}^2}{\rho_H R} \quad (4.5)$$

$$f = 0.079 Re^{-0.25} \quad (4.6)$$

Re steht für die Reynoldszahl.

$$Re = \frac{2 \dot{m} R}{\mu_H} \quad (4.7)$$

Die dabei auftretende effektive Viskosität μ_H muss ebenfalls genähert werden. Dies kann auf verschiedene Arten geschehen. Die einfachste Näherung ist $\mu_H = \mu_L$, bei der die effektive Viskosität gleich der Viskosität der realen Flüssigkeit gesetzt wird. Weitere und genauere Näherungen der effektiven Viskosität finden sich in [KPMYC02] sowie [YMMH08].

- 2-Phasen Reibungsfaktor:

Bei der Näherung des 2-Phasen Reibungsfaktors wird der, durch Reibung entstehende, Druckabfall durch Vergleich mit dem Druckabfall eines 1-Phasen Systems bestimmt. Bei dem 1-Phasen System kommt dabei die gleiche Flüssigkeit, wie sie auch als flüssige Phase im 2-Phasen System auftritt, zum Einsatz. Die Durchflussmenge im 1-Phasen System ist dabei gleich dem Fluss der flüssigen Phase im 2-Phasen System. Der Druckabfall im 1-Phasen System wird mit einem Faktor ϕ^2 multipliziert und ergibt so den Druckabfall im 2-Phasen System.

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{Reibung-2-Phasen}} = \phi^2 \left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{Reibung-1-Phase}} \quad (4.8)$$

Ein typische Annahme für den Multiplikationsfaktor ϕ^2 ist:

$$\phi^2 = \frac{\rho_L}{\rho_H} \left(1 + \frac{x(\rho_L - \rho_G)}{\rho_G}\right) \left(1 + \frac{x(\mu_L - \mu_G)}{\mu_G}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad (4.9)$$

x steht hierbei für den relativen Anteil des Gases am Gesamtmassenstrom. [BRkK06]

Flow Regime Maps

Um die Strömungstopologie zu bestimmen, kann man sogenannte Flow Regime Maps benutzen, die experimentell bestimmt wurden. In ihnen wird

die Leerrohrgeschwindigkeit (Superficial Velocity) von Gas- und Flüssigphase gegeneinander aufgetragen. Die Leerrohrgeschwindigkeit ist definiert als der totale Volumenstrom einer Phase geteilt durch die Querschnittsfläche der Leitung. Einfacher ausgedrückt: diejenige Geschwindigkeit, die eine Phase hätte, wenn sie sich alleine durch die Leitung bewegen würde.

Normale Flow Regime Maps sind für weite Querschnittsbereiche geeignet, verlieren aber ihre Gültigkeit bei sehr kleinen Rohrquerschnitten. Da eine CO₂-Kühlung des Trackers nur sehr kleine Querschnitte erfordert, wie später gezeigt werden wird, muss eine spezielle Flow Regime Map, wie sie in [YMMH08] zu finden ist, benutzt werden (Abbildung 4.2.6). Dabei steht U_{LS} (Liquid Superficial Velocity) für die Leerrohrgeschwindigkeit der Flüssigphase, U_{GS} (Gas Superficial Velocity) für die der Gasphase. Mithilfe dieser Flow

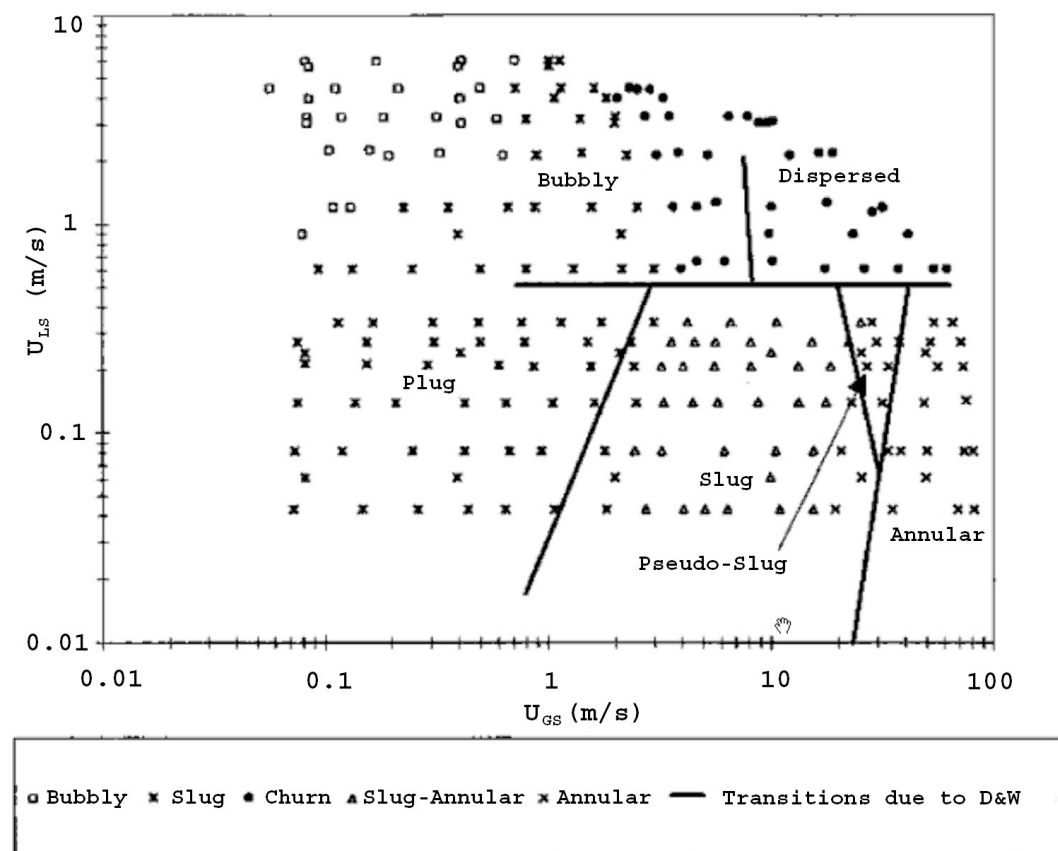


Abbildung 4.2.6: Die Flow Regimes Map zeigt die experimentellen Ergebnisse, wie sie Triplet et al. (1999) erhalten haben, im Vergleich zu den experimentellen Strömungstopologieübergängen von Damianides und Westwater (1998), welche sie mit ihrem Aufbau von 1mm Durchmesser erhalten haben. [YMMH08]

Regime Map kann nun bestimmt werden in welchem Topologiebereich sich eine bestimmte 2-Phasen Strömung befindet. Als Beispiel betrachten wir ein, von CO₂ durchflossenes, Röhrchen mit 2mm Innendurchmesser, welches in der

Lage sein soll 25 Watt an Wärmeleistung bei -40°C abzuführen. Auf der einen Seite wird flüssiges CO_2 eintreten und den Wärmeeintrag durch Verdampfung abführen, auf der anderen Seite sollen sich aus Sicherheitsgründen noch 50% der CO_2 -Masse in der flüssigen Phase befinden. Um die benötigten Leerrohrgeschwindigkeiten zu bestimmen, berechnet man aus der bekannten Verdampfungsenthalpie von CO_2 ($322,4 \text{ J/g}$ bei -40°C) zunächst den benötigten Massenstrom an flüssigem CO_2 . Dies führt zu einem Bedarf von $0,0775 \text{ g/s}$. Dieser Fluss wird auf $0,1555 \text{ g/s}$ verdoppelt, um die erwünschte Sicherheit zu haben. Die Dichte von CO_2 beträgt bei dieser Temperatur $1116 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, so dass der benötigte Massenfluss einem Flüssigkeitsvolumen von $0,1389 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ entspricht. In einem Röhrchen mit einem Innendurchmesser von 2 mm entspricht dies wiederum einer Strömungsgeschwindigkeit von $4,42 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ auf der Eintrittsseite des flüssigen CO_2 . Da an dieser Stelle keine gasförmige Phase vorliegt, entspricht dies auch gleichzeitig der Leerrohrgeschwindigkeit. Am Austritt, wo 50% des Masseanteils verdampft sind, führt der $0,0775 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ große Gasfluss zu einer Leerrohrgeschwindigkeit der gasförmigen Phase von $U_{GS} = 94,47 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Der am Ende austretende Flüssigkeitsstrom hat sich um die Hälfte des Anfangswertes reduziert und hat damit eine Leerrohrgeschwindigkeit von $U_{LS} = 2,21 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Ein Blick auf Abbildung 4.2.6 zeigt, dass sich die Strömung größtenteils in der Plug Topologie abspielt und gegen Ende in den Übergangsbereich zwischen Plug und Slug Topologie eintritt. Reduziert man den Rohrinneindurchmesser auf die Hälfte, so wird der Querschnitt um einen Faktor vier kleiner werden und die Leerrohrgeschwindigkeiten um den selben Faktor größer. Am Ausgang gilt also nun $U_{GS} = 3,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $U_{LS} = 8,84 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Ein weiterer Blick auf Abbildung 4.2.6 verrät, dass sich die Strömung am Ausgang nun bereits deutlich in der Slug Topologie befindet.

Dies stellt aus mehreren Gründen jedoch nur eine Näherung dar, da zum Beispiel die Eigenheiten der verwendeten Medien, wie beispielsweise die Viskosität nicht in der Flow Regime Map berücksichtigt werden. Zum anderen, weil, wie bereits beschrieben, der Wärmeeintrag einen deutlichen Effekt auf die Strömungstopologie hat und hier vollkommen vernachlässigt wurde.

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 4.2.7 die verschiedenen Strömungstopologien, wie sie sich in einem horizontalen Rohr unter Einfluss der Schwerkraft bilden können, gezeigt.

Die in einem System auftretenden Druckabfälle sind teils empfindlich von der vorliegenden Strömungstopologie abhängig. Theoretische Modelle, die diesen Druckabfall bei einer bestimmten Topologie beschreiben, sind nicht generell vorhanden und besitzen, wenn überhaupt, nur in einem engen Parameterbereich, ihre Gültigkeit. Eine Vorhersage für unbekannte Systeme erscheint daher schwierig, so dass stets ein experimenteller Test notwendig ist. Das generelle Vorhandensein einer solchen Abhängigkeit des Druckabfalls von der Strömungstopologie wurde zum Beispiel von Sang Young Son und Jeff Allen eindrucksvoll gezeigt. Sie erhielten bei ihren Experimenten mit

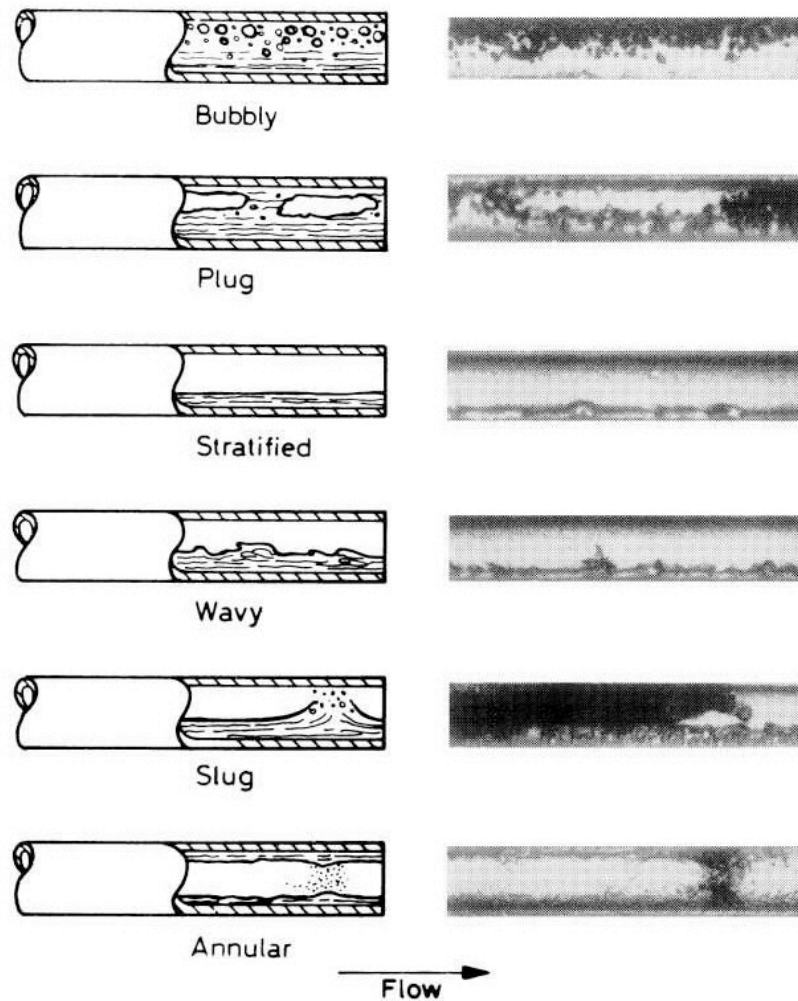


Abbildung 4.2.7: Verschiedene Strömungstopologien, wie sie bei einem horizontalen Rohr auftreten können. [CT96]

2-Phasen Strömungen in einem quadratischen Leiter von 0,33mm Kantenlänge in bestimmten Bereichen bei zunehmendem Durchfluss eine deutliche Reduktion des Druckabfalls. Dies ist mit einem auftretenden Wechsel der Strömungstopologie zu erklären.

Ein weiterer, in dieser Arbeit bisher völlig unerwähnt gebliebener Effekt, ist die Änderung der Siede- und Strömungsbedingungen einer 2-Phasen Strömung in einer von außen beheizten Kühlleitung, wenn diese einer Strahlungsbelastung ausgesetzt ist. Es kommt dabei zu ähnlichen Effekten wie in einer Blaskammer. Einlaufende Teilchen ionisieren Atome des Kühlmediums und diese Ionen dienen wiederum als Keimzelle für Gasblasen. Diese Bedingungen sind selbstverständlich bei einer Detektorkühlung erfüllt und sollten daher ebenfalls berücksichtigt werden. [OSLH04]

4.3 Die LHCb CO₂ Kühlanlage

Im Folgenden soll nun die komplette Kühlanlage beschrieben werden, wie sie bei LHCb sehr erfolgreich Verwendung findet. Diese bereits existierende Kühlung ist von großem Vorteil für die Umrüstung des CMS-Trackers auf eine CO₂-Kühlanlage, da zum einen der Beweis der Funktionalität bereits erbracht wurde und zum anderen bereits Know How über Entwicklung, Aufbau und Betrieb einer solche Anlage existiert.

Die Kühlanlage des LHCb VELO Detektors besteht aus zwei Kühlkreisläufen. In dem Ersten wird mittels einer handelsüblichen Kältemaschine (R404a), die vom Detektor benötigte Kühlleistung bereitgestellt und mittels eines Zweiten, auf CO₂ basierenden Kreislaufs auf den Detektor übertragen und verteilt. Der erste Kreislauf ist in dieser Arbeit weniger von Bedeutung, da er lediglich genügend Kühlleistung bereitstellen muss, sich aber komplett außerhalb des Detektors befindet. Er muss damit keine besonderen Anforderungen hinsichtlich der verwendeten Komponenten, der Wartungsfreiheit, der Temperaturkonstanz oder sonstiger spezieller Eigenschaften, die eine Kühlanlage für einen Teilchendetektor erfordert, erfüllen. Lediglich eine hohe Verfügbarkeit sowie eine geringe Fehleranfälligkeit sind von Nöten. Den weitaus wichtigeren und interessanteren Teil der Anlage bildet der zweite Kreislauf, welcher auf CO₂ basiert. Der systematische Aufbau dieses Teils ist in Abbildung 4.3.8 dargestellt. Eine elektrisch angetriebene Membranpumpe (2), wie sie kommer-

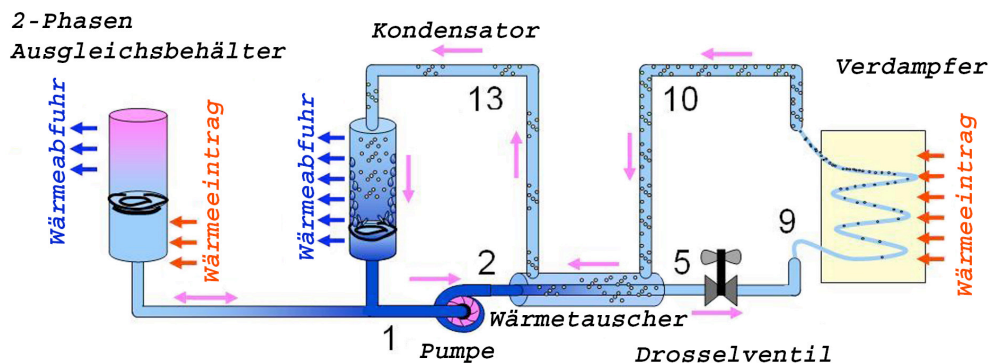


Abbildung 4.3.8: Übersicht der LHCb-VELO Kühlanlage.[BLV07]

ziell verfügbar ist, pumpt das flüssige, kalte CO₂ durch den VELO-Detektor (9-10). Durch den Wärmeeintrag verdampft ein Teil des CO₂ und wird im Kondensator (13) wieder verflüssigt. Der Druckabfall zwischen Verdampfer und Kondensator ist aufgrund der Eigenschaften von CO₂ sehr klein, was bedeutet, dass beide mit näherungsweise gleichem Druck arbeiten. Da die Temperatur von CO₂ an der Phasengrenze natürlich vom Druck abhängt, muss eine Möglichkeit vorhanden sein den Druck im gesamten System zu regulieren. Dazu ist zwischen Pumpe und Kondensator ein Abzweig angebracht, welcher zu einem Ausgleichsbehälter führt. In diesem Ausgleichsbehälter

herrscht fast der gleiche Druck wie im Verdampfer und im Kondensator. Er enthält eine Mischung aus flüssigem und gasförmigem CO₂, welches sich genau an der Phasengrenze befindet. Innerhalb des Ausgleichsbehälters ist ein vom ersten Kreislauf (R404a) versorgter Wärmetauscher sowie eine Heizung eingebaut. Auf diese Art kann nun der Anteil von Flüssigkeit und Gas im Ausgleichsbehälter und damit der Druck geregelt werden. Um den Druck zu erhöhen, wird einfach die elektrische Heizung aktiviert, so dass flüssiges CO₂ verdampft und der Druck steigt. Wird mittels des Wärmetauschers gekühlt, so kondensiert gasförmiges CO₂ und der Druck sinkt.

Soll ein flüssiges Medium, welches sich an der Phasengrenze befindet, mechanisch gepumpt werden, so tritt Kavitation an der Pumpe auf. Dies führt auf Dauer zur Zerstörung der Pumpe oder, wenn diese dafür ausgelegt ist, zumindest zu einem deutlichen Pumpleistungsabfall. Um dies zu verhindern, wird das CO₂ durch den Kondensator (13) unterkühlt, das heißt die Temperatur wird auf einen Wert deutlich unterhalb des Phasenübergangs reduziert. Mit der Pumpe ist es auf diese Art problemlos möglich das CO₂ zu fördern. Im Detektor soll aber überall die gleiche Temperatur herrschen, daher kann das unterkühlte CO₂ nicht einfach in den Detektor gepumpt werden. Es muss vorher sichergestellt werden, dass es sich an der Phasengrenze befindet. Dazu bedient man sich eines Wärmetauschers, der zwischen Hin- und Rücklauf des Detektors installiert ist. Der Wärmetauscher besteht jedoch nicht aus einem separaten Bauteil, sondern aus einer coaxialen Leitung von der Pumpe (2) zum Detektor (9-10), welche etwa 50 Meter lang ist. So kann auf einen extra Wärmetauscher verzichtet werden, welcher das Ausfallrisiko unnötig erhöhen würde.

In Abbildung 4.3.9 sind die Stellen des P-h Diagramms gezeigt an denen sich das CO₂ an den verschiedenen Positionen auf dem Weg durch den Kühlkreislauf befindet. Wir starten an Punkt 1 im unterkühlten Bereich vor der Pumpe. Von 1 zu 3 wird der Druck durch die Pumpe erhöht, gleichzeitig erhöht sich, durch die Abwärme der Pumpe, die Enthalpie ein wenig. Zwischen Punkt 3 und 5 liegt die coaxiale Verbindungsleitung, welche als Wärmetauscher wirkt und die Enthalpie erhöht. Von Punkt 5 über Punkt 6 zu Punkt 9 wird der CO₂-Druck schrittweise durch das Drosselventil und die Kapillare reduziert, so dass es sich an der Phasengrenze befindet und in den Verdampfer eintritt. Durch die Wärmeleistung des Detektors kommt ein Teil des Kühlmediums zur Verdampfung und befindet sich nun an Punkt 10. Es bewegt sich nun durch die Koaxialleitung zurück in Richtung Kondensator und gibt Enthalpie an das unterkühlte CO₂, welches sich auf dem Weg zum Detektor befindet, ab. Schließlich wird das CO₂ durch den Kondensator unterkühlt und wir befinden uns wieder an der Ausgangsposition.

Wie man erkennen kann, gibt es bei dieser Art der 2-Phasenkühlung nur eine Regelgröße. Einzig durch den Druck im Ausgleichsbehälter ist die Temperatur im Detektor bestimmt und keine aktive Komponente ist im

muss lediglich sichergestellt werden, dass die Temperatur tief genug ist, um das CO₂ ausreichend zu unterkühlen. Auch die CO₂-Pumpe bedarf keiner Regelung; sie kann immer mit konstanter Leistung betrieben werden. Es muss nur sichergestellt sein, dass der Durchfluss groß genug ist, um ein komplettes Verdampfen des Kühlmediums zu vermeiden.

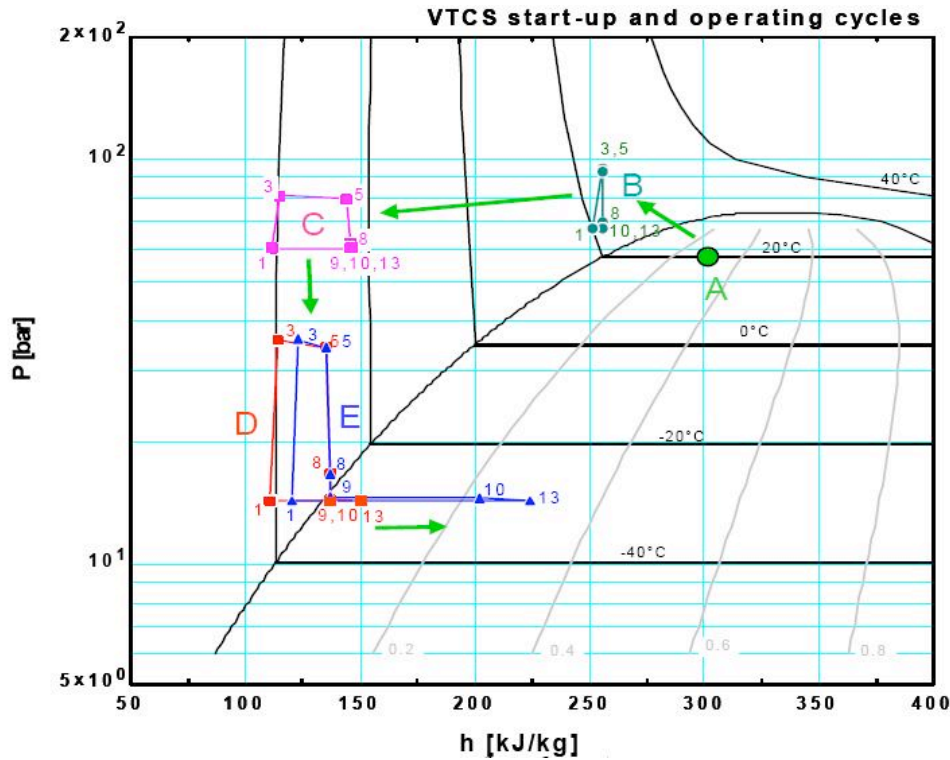


Abbildung 4.3.10: Verschiedene Betriebsmodi der LHCb-VELO Kühlanlage. Um das System von Raumtemperatur (Punkt A) abzukühlen, wird zunächst durch hohem Druck CO₂ verflüssigt (Punkt B) und durch den Detektor gepumpt. Nun wird das CO₂ und damit der Detektor im 1-Phasenbetrieb immer weiter abgekühlt (Punkt C), bis schließlich durch Senken des Drucks Punkt D erreicht wird und der Detektor hochgefahren werden kann (Punkt E). [Ver08]

Bei der gesamten bisherigen Beschreibung wurde davon ausgegangen, dass der Detektor und das gesamte System bereits kalt sind. Einige Male muss dieses System aber auch angefahren und der Detektor von Raumtemperatur abgekühlt werden. Dazu macht man sich zunutze, dass sich dieses 2-Phasenkonzept zu einer 1-Phasenkühlung umwandeln lässt. In Abbildung 4.3.10 ist dieser Prozess dargestellt. Dazu wird der Ausgleichsbehälter auf etwa 27°C aufgewärmt, so dass der Druck im gesamten System ansteigt. Da die Raumtemperatur kleiner als 27°C ist, liegt der Dampfdruck im System unter dem Druck des Ausgleichsbehälters. So ist sichergestellt, dass sich, abgesehen vom Ausgleichsbehälter, kein gasförmiges CO₂ im System befinden

kann (Punkt A in 4.3.10). Ohne Gas im System kann die Pumpe problemlos gestartet werden und das flüssige CO₂ beginnt im System zu zirkulieren (Punkt B). Nun kann die Kältemaschine, die den ersten Kühlkreis bildet, eingeschaltet werden und das CO₂ kühlt sich immer weiter ab, bis wir uns an Punkt C befinden. Dabei arbeitet das System immer noch im 1-Phasenmodus. Die Temperatur beträgt direkt nach dem Kondensator dabei etwa -40°C und -22°C am ausgeschalteten Detektor. Diese große Differenz kommt zum einen durch den Wärmeeintrag an der Koaxialleitung und zum anderen durch die im Vergleich zur Verdampfungsenthalpie sehr kleinen Wärmekapazität zustande. Wird nun der Druck im Ausgleichsbehälter reduziert indem man ihn abkühlt, so verringert sich der Druck im System und es beginnt im 2-Phasenmodus zu arbeiten (Punkt D). Sobald sich das System im 2-Phasenmodus befindet, kann die Temperatur im Detektor wieder durch den Druck im Ausgleichsbehälter bestimmt werden. Hat sich nach kurzer Zeit der 2-Phasenmodus stabilisiert, so kann der Detektor hochgefahren werden. [BLV07]

5 Prototyp einer neuen Kühlung und Stromversorgung für den CMS-Tracker

Am Anfang stand die Idee das Materialbudget des jetzigen CMS-Trackers bei der sich, durch ein Upgrade, bietenden Möglichkeit substantiell zu reduzieren. Dieses Upgrade des CMS-Trackers wird notwendig, da geplant ist, voraussichtlich im Jahr 2016, die Luminosität des LHC um etwa eine Größenordnung zu erhöhen, wodurch ein neues Design des Trackers notwendig wird. Dabei muss die nach dem SLHC Upgrade deutlich erhöhte Strahlungsbelastung sowie die erhöhte occupancy beachtet werden, da diese ebenfalls um etwa eine Größenordnung ansteigen wird. Dies erfordert ein strahlenhärteres Sensordesign sowie eine erhöhte Granularität, also mehr Kanäle. Außerdem wird eine verbesserte Kühlung des CMS-Trackers benötigt, um diesen bei tieferen Temperaturen betreiben zu können. Bei einer tieferen Betriebstemperatur sinkt der Leckstrom nach Gleichung 2.14 ab, so dass die Leistungsaufnahme und damit die Gefahr eines thermal runaway deutlich reduziert wird. Zusätzlich wird durch die tiefere Temperatur auch das Rauschen der Silizium-Sensoren reduziert, so dass das Signal to Noise Verhältnis verbessert wird.

Ein weiterer, sehr wichtiger Punkt ist eine Reduktion des Materialbudgets. Dies ist von großer Wichtigkeit, da mit zunehmendem Materialbudget zum Beispiel die photon conversion rate sowie die Vielfachstreuung zunimmt. Das heißt, dass immer mehr Photonen über Paarbildung Elektron-Positron-Paare bilden und so die occupancy stark erhöhen. Dadurch nimmt unter anderem die Impulsauflösung sowie die Effizienz der Spurrekonstruktion der Pionen ab und die Anzahl der fälschlicherweise erkannten Spuren zu. [BE08]

Wie in Abbildung 3.4.6 zu sehen ist, bilden die Kabel der Stromversorgung, das Material, welches zur Kühlung verwendet wird sowie die mechanische Struktur bei dem heutigen Tracker einen deutlichen Beitrag zum Materialbudget. Diese drei Punkte bieten sich als Ansatz für eine Verminderung an, da an anderen Beiträgen, wie beispielsweise dem, als Detektormaterial verwendeten, Silizium oder der Ausselelektronik, nur wenig reduziert werden kann.

Um dieses Ziel zu erreichen, könnte ein Strawman Design für den neuen Tracker, wie es in Abbildung 5.0.2 gezeigt wird, verwendet werden. Dies würde den Vorteil bieten, dass sich bei einem solchen Design alle Anschlüsse für Kühlung und Stromversorgung an der Oberfläche, das bedeutet außerhalb des sensiti-

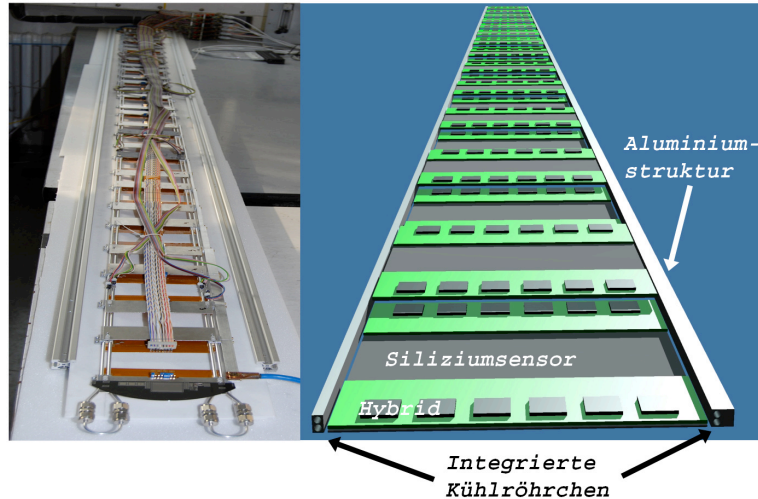


Abbildung 5.0.1: Schematische Zeichnung eines möglichen Super-Moduls im Vergleich zum getesteten Prototypen. Anstatt zweier einzelner Kühlröhrchen auf jeder Seite kommt in dieser Zeichnung eine Aluminiumstruktur zum Einsatz, welche die Kühlröhrchen enthält und im Querschnitt angepasst ist, um die Spannungsabfälle zu reduzieren. Die Konstruktion erlaubt es außerdem die einzelnen Module überlappend anzuordnen, so dass in Z-Richtung keine Lücken in der Sensorabdeckung entstehen.

ven Volumens, befinden, was das Materialbudget deutlich reduzieren würde. Der in Abbildung 3.1.2 in rot eingezeichnete, treppenartige Bereich, in dem ein Großteil der Leitungen von Kühlung und Stromversorgung von TIB und TID verlaufen und der zu großen Teilen für die Peaks des Materialbudgets bei $1 < |\eta| < 2$ verantwortlich ist, würde komplett vermieden.

Der Bau einer langen Barrelektion, bei der sich alle Anschlüsse für Kühlung und Stromversorgung am Ende befinden, erfordert lange einzelne Strukturen, die zu einer Barrelektion zusammengesetzt werden können. Eine solche mögliche Struktur ist in Abbildung 5.0.1 auf der rechten Seite gezeigt. Die Kühlung einer solchen Struktur muss über lange Strecken verlaufen, weshalb sich der Einsatz einer CO_2 basierten Kühlung anbietet. Ein weiterer Punkt ist die Stromversorgung, die bei einem Aufbau, wie er in Abbildung 5.0.2 gezeigt wird, über die Kühlröhrchen verlaufen kann. Da diese ohnehin Kontakt mit jedem Sensor und der verwendeten Ausleseelektronik haben müssen, bietet sich eine doppelte Nutzung an, was das Materialbudget weiter reduziert.

Neben der schematischen Ansicht ist in Abbildung 5.0.2 auf der linken Seite ein Prototyp gezeigt, der im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde. An ihm wurde das Verhalten und die prinzipielle Machbarkeit eines solchen Konzeptes, das Kühlung, Stromversorgung und mechanische Halterung in eine einzige Struktur integriert, untersucht.

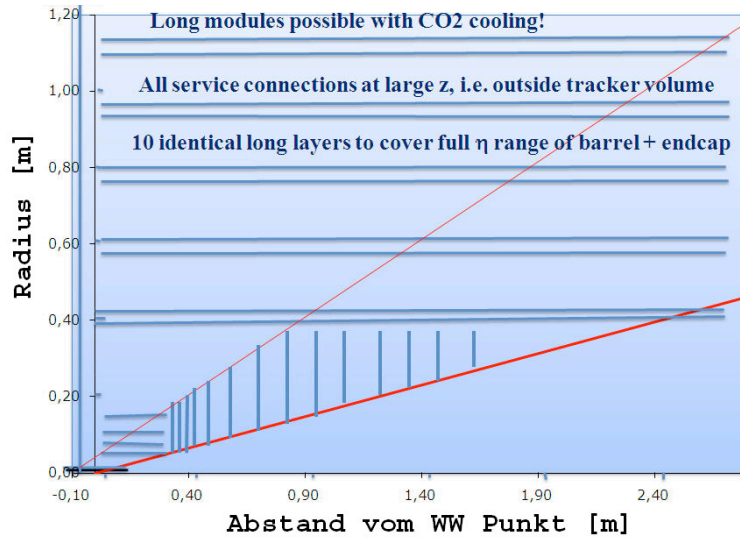


Abbildung 5.0.2: Schematische Darstellung eines möglichen Designs für das CMS-Tracker Upgrade mit längerer Barrelsektion und Endkappen bei kleinen Radien. [BE08]

5.1 Aufbau des Prototyps

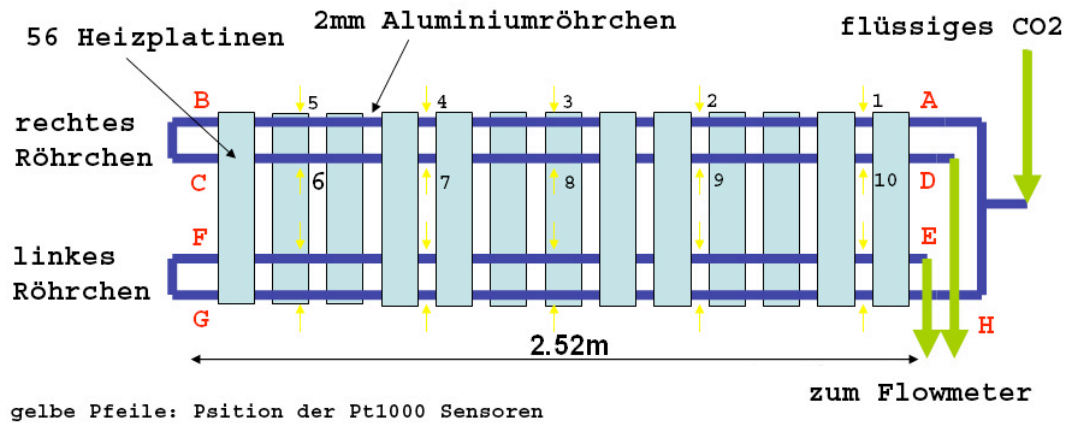


Abbildung 5.1.3: Schematische Darstellung des Prototyps

Die Dimensionen des gebauten Prototyps leiten sich aus der Größe des realen CMS-Trackers ab. Er besteht aus je zwei parallelen Aluminiumröhrchen mit einem Innendurchmesser von je 2mm auf jeder Seite und hat eine Länge von 2,52m, was der halben Länge des jetzt verwendeten Trackers entspricht. Zwischen den Röhrchen sind elektrische Heizungen befestigt, um den Wärmeeintrag von Sensor und Ausleseelektronik simulieren zu können. Eine schematische Ansicht des Aufbaus ist in Abbildung 5.1.3 dargestellt. Die Röhrchen auf beiden Seiten bestehen aus reinem Aluminium und nicht etwa

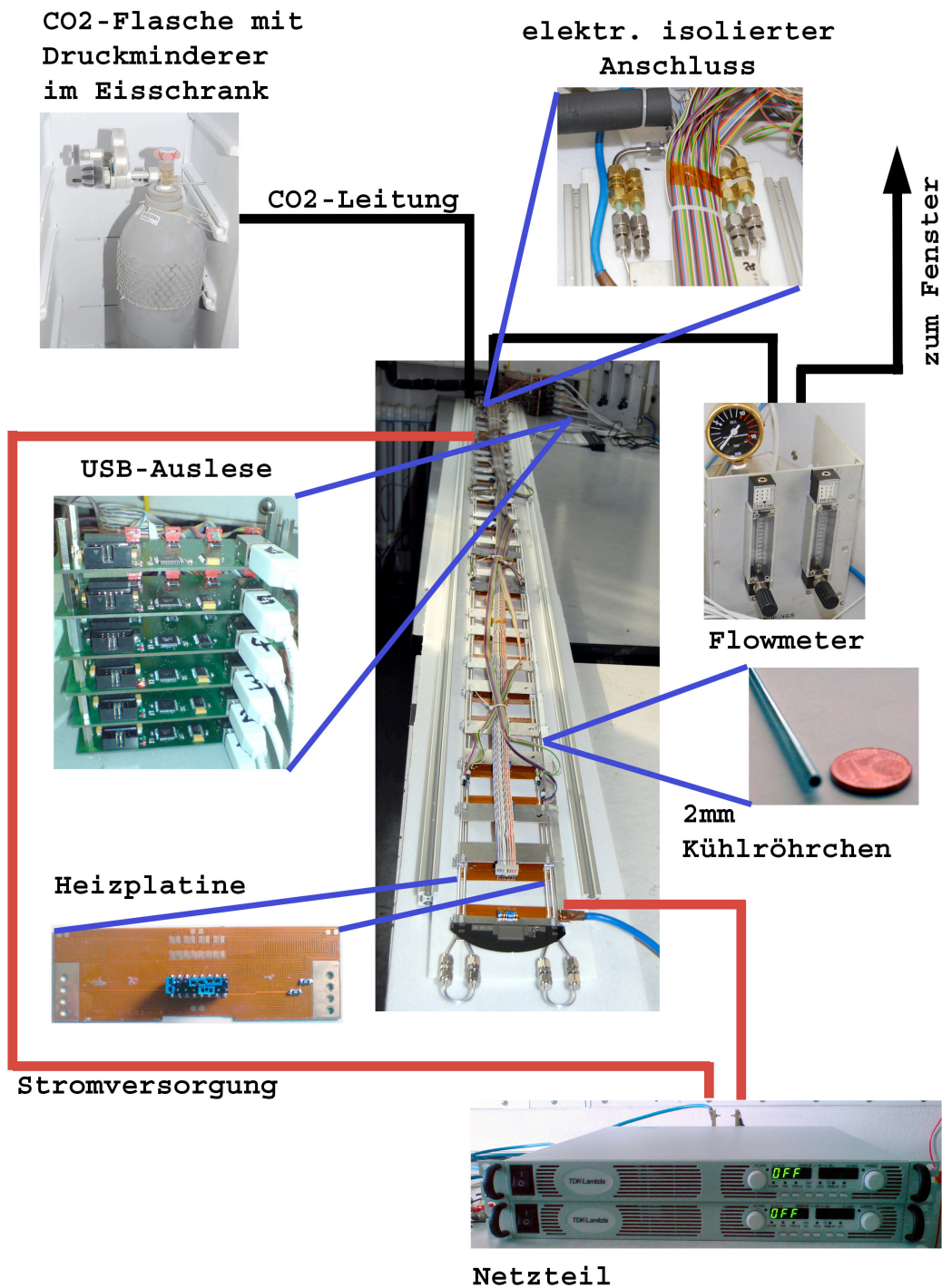


Abbildung 5.1.4: Übersicht der Versuchsanordnung

aus einer Aluminiumlegierung, wie sie normalerweise Verwendung findet. Reines Aluminium besitzt einen deutlich niedrigeren spezifischen Widerstand als eine Aluminiumlegierung sowie einen deutlich größeren Widerstandsbeiwert. Reines Aluminium weist daher bei tiefen Temperaturen, wie sie zur Kühlung benötigt werden, noch einmal einen deutlich reduzierten Widerstand auf, was ein großer Vorteil gegenüber einer Aluminiumlegierung ist und die Nachteile wie zum Beispiel die niedrigere Festigkeit sowie die schwierige spanende Bearbeitung mehr als aufwiegt. Der niedrigere Widerstand kommt dadurch zustande, dass bei einer Legierung der Widerstand zu größeren Teilen durch Störstellen bestimmt wird. Reines Aluminium besitzt weniger Fremdatome, was zu weniger Störstellen und damit zu einem kleineren Widerstand führt.

Wie man an Tabelle 5.1 ablesen kann, hat man durch die Verwendung

	Al95Mg5	Al97Mg3	Al98Mg1Si0,6	Al98Mg1Si0,1	Al99Si1	Al rein
Dichte [$\frac{g}{cm^3}$]	2,65	2,67	2,69	2,69	2,7	2,7
E-Modul [Gpa]		65-75	70	69	71,1	70,6
Zugfestigkeit [Mpa]	300-450	200-350	150-430	245-325	310	130-195
Wärmeleitfähigkeit [$\frac{W}{mK}$]	125-130	135-160	180-193	180-195	-	237
Spez. Widerstand [$10^{-8}\Omega m$]	5,6-6,1	4,5-5,7	3,4-3,8	3,4-3,8	2,6-3,5	2,64
Widerstandsbeiw. [$10^{-3}K^{-1}$]	2	1,9-2,6	3	3,1-3,5	4,2	4,5

Tabelle 5.1: Vergleich der physikalischen Eigenschaften verschiedener Aluminiumlegierungen. Generell kann man sagen, dass der spezifische Widerstand einer Aluminiumlegierung abnimmt und der zugehörige Widerstandsbeiwert zunimmt, je niedriger der Anteil an zulegierten Elementen ist. Das Gleiche gilt für die Wärmeleitfähigkeit, die ebenfalls zunimmt, je reiner das Aluminium ist.[Goo08]

von reinem Aluminium bei einer Temperatur von -40°C einen um etwa 27% kleineren Widerstand gegenüber einer handelsüblichen Legierung, welcher direkt in eine Reduktion des Querschnitts und somit des Materialbudgets umgesetzt werden kann.

Zwischen den parallelen Röhrchen befinden sich 56 Heizplatinen aus dünnem, flexiblem Kaptonmaterial, welches zur besseren Wärmeleitung auf eine Aluminiumplatte geklebt wurde. Dieses Sandwich wurde nun auf spezielle Halteblöcke aus Aluminium geschraubt (technische Zeichnung im Anhang), welche die Verbindung zu den seitlichen Röhrchen herstellen. Die Halteblöcke bestehen aus zwei Teilen, so dass sie mittels zweier Schrauben um die Röhrchen geklemmt werden können und so einen guten elektrischen wie auch thermischen Kontakt herstellen. Die Verbindung dieser Sandwichheizter wurde dabei so gewählt, dass die Heizwindungen einen guten elektrischen wie thermischen Kontakt zu den Halteblöcken aufweist, die Aluminiumplatte dabei aber elektrisch isoliert ist. Um dies zu erreichen, wurden Nygonschrauben benutzt, um das Sandwich kopfüber auf den Blöcken zu befestigen.

Da noch nicht abschließend geklärt ist bei welcher Spannung und mit welchem Strom die Ausleselektronik zukünftig arbeiten wird, wurden die Heizungsplatinen so gestaltet, dass über Jumper der Heizwiderstand verändert werden kann und so bei verschiedene Strom-Leistungsverhältnisse getestet

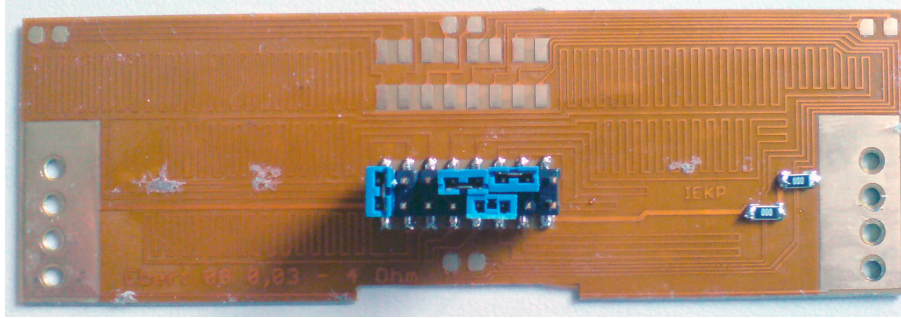


Abbildung 5.1.5: Die aus dünnem, flexiblem Kapton gefertigte Heizplatine verfügt über die Möglichkeit der Widerstandsanpassung in einem Bereich von $0,03\Omega$ bis 4Ω in Schritten von $0,03\Omega$. Die im Bild teilweise mit Jumpfern bestückte Stiftleiste dient zur Auswahl des gewünschten Widerstandes. Die nicht bestückten Löt pads oberhalb der Stiftleiste können ebenfalls mit einer solchen bestückt werden und dienen dann als Anschluss für die 4 Pt100 oder Pt1000 mit denen die Platine ebenfalls ausgerüstet werden kann.

werden konnte. Es erscheint zunächst, als sei es vollkommen egal mit welchem Strom die Heizleistung bereitgestellt wird; dies ist aber nicht der Fall, da alle 32 Heizer parallel geschaltet sind und so am Ende ein sehr großer Strom von den Aluminiumröhrchen geführt werden muss. Dieser hohe Strom führt zu einer nicht unerheblichen Wärmeentwicklung durch den Widerstand des Aluminiums, außerdem fallen die Spannungsabfälle in den Röhrchen je nach Stromstärke unterschiedlich aus. Will man nun die Kühlung und Stromversorgung bei gleicher Leistung und verschiedenen Strömen untersuchen, so ist es nötig den Widerstand der Heizer variieren zu können. Außerdem erwies sich diese Regelmöglichkeit als großer Vorteil, da sich herausstellte, dass jede Platine, obwohl industriell gefertigt, einen deutlich unterschiedlichen Widerstand aufwies. Der Grund für diese Abweichungen ist vermutlich in einer ungleichmäßig dicken Kupferauflage zu finden.

Die gesamte Struktur ist auf eine Platte aus Rohacell montiert. Rohacell eignet sich sehr gut als mechanische Unterstützung in einem Detektor, da es in der verwendeten Dichte von $71 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ eine sehr große Strahlungslänge von 5,45 Meter aufweist und trotzdem eine erstaunliche Stabilität und Steifigkeit besitzt. Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Rohacell liegt mit $3,3 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$ nahe bei dem von Aluminium ($2,3 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$), so dass es bei Abkühlung des Prototypen nur zu geringen thermischen Spannungen kommt. Da der gesamte Prototyp gekühlt werden soll, war es notwendig, ihn mittels einer Isolationsbox von der Umgebung zu isolieren, um die Messergebnisse nicht zu verfälschen. Die Isolierung nach unten wird zu einem großen Teil durch das verwendete Rohacell erledigt, dessen Isolationsvermögen aber zur Sicherheit noch durch weiteres Styropor erhöht wurde.

5.2 Stromversorgungsschema

Der zur Zeit im CMS-Tracker verwendete Auslesechip (APV25) benötigt eine sehr konstante Spannung, welche nur um wenige Millivolt nach oben oder unten abweichen darf. Daher ist es wichtig, bei einem Design der Stromversorgung darauf zu achten, dass es nicht zu größeren Spannungsdifferenzen zwischen den einzelnen Modulen kommt.

Die Stromversorgung des Prototyps kann auf verschiedene Arten erfolgen. Um jedem Modul die gleiche Versorgungsspannung zur Verfügung zu stellen, müssen die Spannungsabfälle zwischen den einzelnen, auf die Kühlröhrchen montierten Module, möglichst klein ausfallen. Dies erfordert einen hohen Leitungsquerschnitt, was wiederum im Widerspruch zu dem geforderten kleinen Materialbudget steht. Übersetzt man diese geforderte Spannungs Konstanz in den erforderlichen Leiterquerschnitt bei einer Stromversorgung über die Punkte A und C in Abbildung 5.2.6, so wird unmittelbar klar, dass dies nur mit unrealistisch großen Querschnitten funktionieren könnte.

Gestaltet man die Stromversorgung dagegen derart, dass der Strom an Punkt

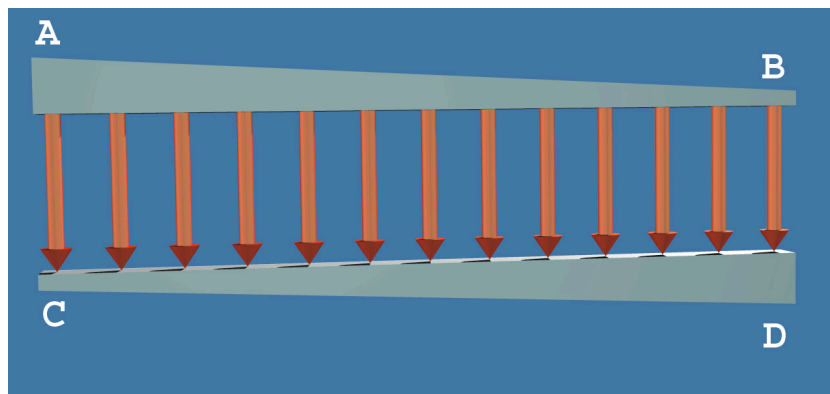


Abbildung 5.2.6: Schematische Darstellung des Prototyps. Die roten Pfeile symbolisieren die Heizplatinen.

A eintritt und an D wieder austritt, so gleichen sich die unweigerlich vorhandenen Spannungsabfälle teilweise wieder aus. Trotzdem erfolgt dieser Ausgleich nicht vollständig, da der Strom der oberen Leitung in Abbildung 5.2.6 von Punkt A zu Punkt B immer weiter abnimmt, bis am Ende nur noch ein Modul versorgt werden muss. Umgekehrt nimmt der Strom von Punkt C zu D immer weiter zu. Durch die verschieden großen Ströme und damit auch verschieden großen Spannungsabfällen zwischen den einzelnen Modulen wird ein kompletter Ausgleich verhindert.

Um die Spannungs Konstanz weiter zu verbessern, wurden seitlich zusätzliche Stromschienen, ebenfalls aus reinem Aluminium, montiert. Die in Abbildung 5.2.6 gezeigte Keilform wurde aus fertigungstechnischen Gründen nicht realisiert. Mittels dieser Stromschienen kann erreicht werden, dass die Spannungsabfälle zwischen den einzelnen Modulen näherungsweise gleich sind, indem an

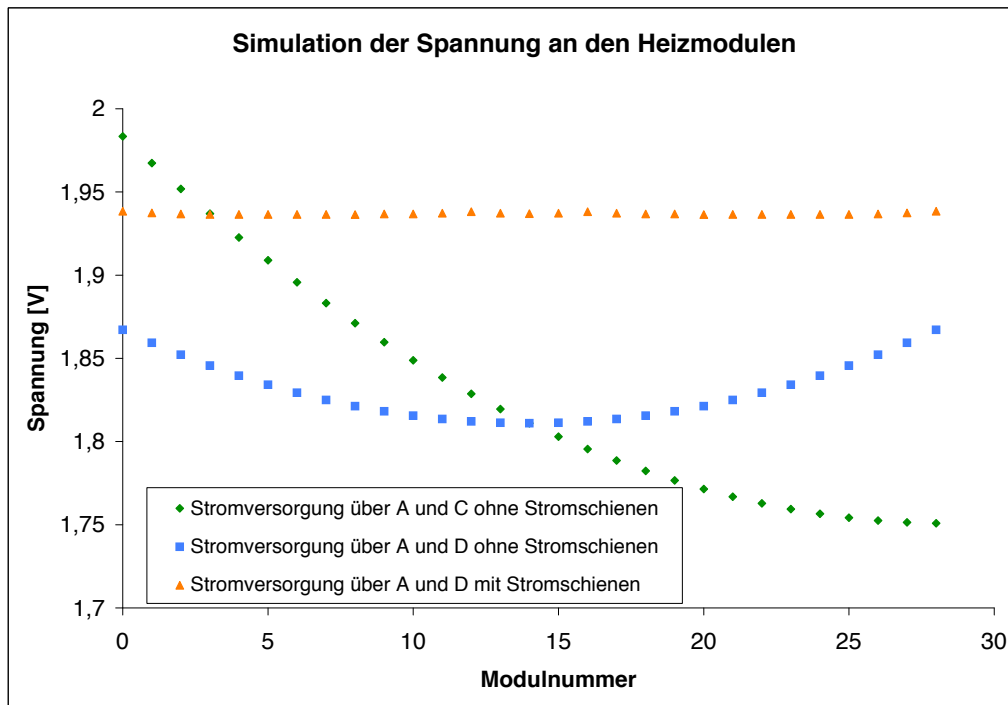


Abbildung 5.2.7: *Simulation der Spannung an den einzelnen Heizplatinen bei verschiedenen Stromversorgungsschemata und einem Gesamtstrom von 22,4A (jeweils 0,8A pro Heizplatine). Die maximale Spannungsdifferenz unterscheidet sich je nach Stromversorgungsschema beträchtlich. Bei Versorgung über A und C ohne Stromschiene tritt eine maximale Spannungsdifferenz mehr als 0,2V auf. Wird der Strom ohne Stromschienen über A und D zugeführt verringert sich die Differenz auf weniger als 0,1V. Bei Versorgung über A und D mit Stromschienen liegt die maximale Spannungsdifferenz bei nur 1,89mV*

einem Teilstück mit größerem Strom eine dickere Stromschiene montiert wird. Im Idealfall sollte das Verhältnis von Strom und Querschnitt und somit die Stromdichte an jedem Punkt der Leiter gleich sein. Dies würde sicher stellen, dass an jedem Modul die gleichen Spannung anliegt. Unter Ausnutzung der erlaubten Toleranzen, wie sie und auch im jetzt verwendeten Stromversorgungssystem des Trackers auftreten, wurde nicht für jeden Modulzwischenraum eine individuelle Schiene angefertigt, sondern sechs verschiedene Schienen so verteilt, dass die Spannungsunterschiede minimal werden.

Eine wichtige Eigenschaft dieses Stromversorgungsschemas ist die Tatsache, dass im Sinne einer konstanten Stromdichte, der Leiterquerschnitt Kühlröhrchen an Stellen mit kleiner Stromstärke möglichst klein sein sollte, um an Stellen mit großer Stromstärke nicht zu viel Material als Ausgleich verwenden zu müssen. Die Verwendung von dünneren Kühlröhrchen oder solchen mit einer kleineren Wandstärke spart so nicht nur das primär reduzierte Material ein, sondern sekundär auch das Material der korrespondierenden

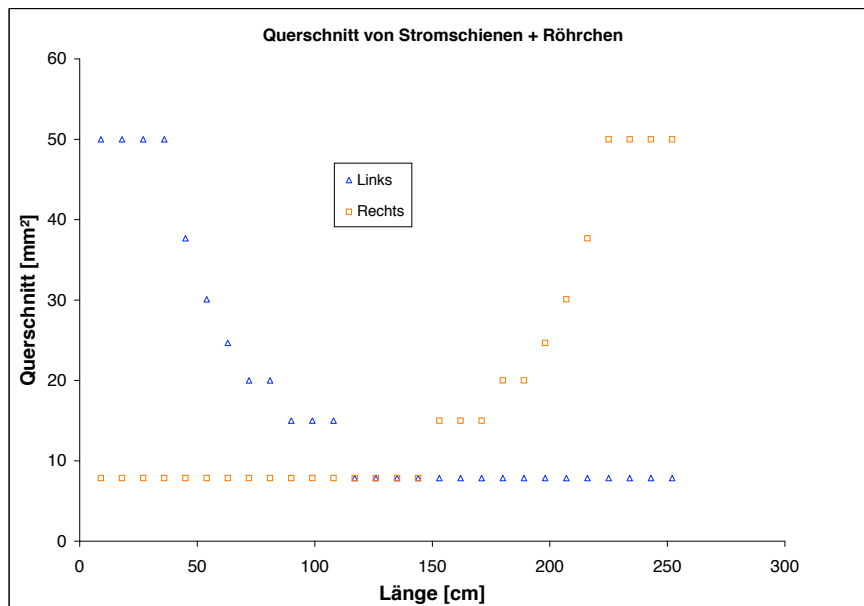


Abbildung 5.2.8: Querschnitte einer Kühlleitungen mit den zusätzlich angebrachten Stromschienen zur Verringerung der maximalen Spannungsdifferenzen zwischen den Modulen. Der Querschnitt der Röhrchen ohne Stromschienen beträgt $7,85\text{mm}^2$

Stromschienen, die dadurch einen geringeren Querschnitt aufweisen müssen. Die Verkleinerung des Querschnitts kann natürlich nur soweit fortgesetzt werden wie eine ausreichende Kühlleistung gewährleistet werden kann. Außerdem steigt mit abnehmendem Querschnitt der Widerstand der Anordnung linear an, was zu einem ebenfalls linearen Anwachsen der Wärmeverlustleistung in Kühlröhrchen und Stromschienen führt.

5.3 Materialbudget und Verlustleistung

Der Prototyp mit den Leiterquerschnitten, wie sie in Abbildung 5.2.8 dargestellt sind, führt mit dem verwendeten reinen Aluminium zu einem Materialbudget von 0,4% einer Strahlungslänge pro Lage. Dabei ist nur das zur Kühlung und Stromversorgung benötigte Material ohne die Halteblöcke berücksichtigt. Material von Sensor und Elektronik ist nicht enthalten. Die Strahlungslänge ist lokal sehr verschieden von dem Mittelwert von 0,4%, da dieser Wert durch die Annahme entsteht, dass das gesamte Material auf die komplette Sensorfläche verschmiert ist. Diese Näherung ist bei einer einzelnen Lage natürlich nur sehr unzureichend gegeben. Werden aber mehrere Lagen, wie im Tracker, übereinander und gegeneinander versetzt angeordnet, so gleichen sich die unterschiedlichen Materialdicken näherungsweise aus und erlauben diese Näherung. Dieser Wert gilt selbstverständlich auch nur bei senkrechtem Durchgang der Strahlung durch den Prototyp und nimmt bei schrägem

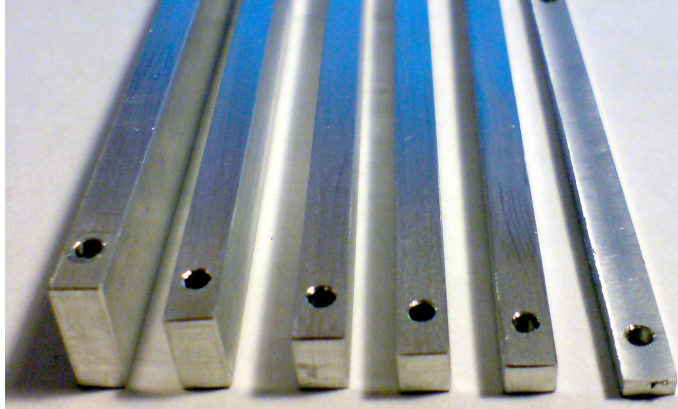


Abbildung 5.2.9: Seitlich an den Halteblöcken befestigte Stromschienen zur Verbesserung der Spannungskompensation. Die Abbildung zeigt von links nach rechts Stromschienen mit den Querschnitten $42,16\text{mm}^2$; $29,84\text{mm}^2$; $22,24\text{mm}^2$; $16,84\text{mm}^2$; $12,16\text{mm}^2$ sowie $7,16\text{mm}^2$.

Durchgang entsprechend auf $\frac{0,4\%}{\cos \alpha}$ zu, wobei α für den Winkel der Abweichung vom senkrechten Durchgang steht.

Mittels der berechneten Spannungsabfälle an den einzelnen Punkten und der Annahme einer Gesamtstromstärke von 22,4A kann leicht die Leistung berechnet werden, die innerhalb der Aluminiumröhrchen und Stromschienen in Wärme umgesetzt wird. Diese Leistung ist mit 1,46 Watt bei 22,4A äußerst niedrig und selbst bei einer Verdoppelung der Stromstärke auf 44,8A, was etwa den Erwartungen eines mit Sensoren und Ausleseelektronik bestückten Supermoduls entspricht, ist die nun viermal so große Verlustleistung mit 5,84Watt immer noch sehr niedrig. Der Grund, warum bei den gezeigten Simulationen jeweils nur die Hälfte des erwarteten Stroms benutzt wurde, liegt darin, dass ein direkter Vergleich mit der Messung gewährleistet sein sollte. Eine Messung der Spannungsabfälle am Prototypen ist nur ohne Isolationsbox möglich. Ohne Isolationsbox kann aber die Kühlung nicht aktiviert werden, da es sonst zu Eisbildung auf den Heizplatinen und an den Kühlröhrchen kommt. Ohne eine Kühlung kann wiederum der Strom nicht auf den vollen, erwarteten Wert geregelt werden, da dies zu einer Überhitzung des Prototyps führen würde.

5.4 Temperatúrauslese

Um die am Prototyp auftretenden Temperaturen zu bestimmen, wurden insgesamt 20 PT1000 Temperatursensoren direkt mittels Wärmeleitklebers, an den in Abbildung 5.1.3 gezeigten Positionen, auf die durchströmten Aluminiumröhrchen geklebt und durch selbst gebaute und von Stefan Heier entwickelte USB-Karten ausgelesen. Zusätzlich sind auf vier der Heizplatinen je 2 PT100 Sensoren verbaut, um einerseits sicherzustellen, dass es nicht zu einer Überhitzung der Platinen kommen kann und andererseits um die

Güte der Wärmeleitung von den Platinen in die Kühlröhrchen abzuschätzen. Dabei kam jeweils eine 4-Pol Messung zum Einsatz, da es ansonsten durch die unterschiedlichen Messkabelängen zu einem zu großen Messfehler gekommen wäre. Die erhaltenen Temperaturdaten der einzelnen Sensoren werden auf den USB-Karten digitalisiert und über eine virtuelle serielle Verbindung jede halbe Sekunde an den Rechner geschickt. Die Temperaturdaten werden mittels Labview grafisch dargestellt und auf dem PC zur späteren Auswertung gesichert.

5.5 Aufbau der CO₂ Kühlanlage

Da der gesamte Aufbau mittels flüssigem CO₂ gekühlt werden sollte, musste zunächst eine Kühlanlage entworfen werden, da keine kommerzielle CO₂-Anlage zu einem annehmbaren Preis erhältlich war. Um die Anlage einfach und fehlerunanfällig zu halten, wurde beschlossen auf ein geschlossenes System zu verzichten und das CO₂ stattdessen nach Gebrauch einfach ins Freie zu leiten. Zunächst bestand die Idee darin eine CO₂ Flasche bei Raumtemperatur zu verwenden. Das CO₂ wäre einfach durch den zu testenden Prototypen geströmt und hätte sich durch Verdampfung auf die gewünschte Temperatur abgekühlt. Da in diesem Fall erst einmal das CO₂ selbst abgekühlt werden müsste, hätte dies zu einem sehr viel größeren, erforderlichen Massenstrom geführt. Außerdem hätte bereits auf der Eingangsseite ein erheblicher Massenanteil des CO₂ (etwa 2/3) gasförmig vorgelegen, so dass es in den dünnen Aluminiumröhrchen durch den nun viel größeren Volumenstrom zu einem erheblichen Druckabfall und damit Temperaturabfall gekommen wäre. Das Problem des gasförmigen CO₂ auf der Eingangsseite ließe sich dadurch vermeiden, dass man zwischen Flasche und Eingang des Prototyps einen Wärmetauscher montiert. Das aus dem Prototyp austretende kalte CO₂ würde nun dazu dienen das einströmende CO₂ zu kühlen. Dieser Aufbau erschien zunächst sehr einfach und wurde so bereits verwendet. Die Funktionsfähigkeit stand also außer Frage. Auch bei solch einem Aufbau wird aber ein unnötig großer CO₂-Massenstrom benötigt, da etwa zwei Drittel benötigt würden, um das CO₂ selbst zu kühlen und nur etwa ein Drittel der möglichen Kälteleistung bei diesem Durchfluss im Detektorprototyp zur Verfügung stehen würde. Dabei ist der Hauptnachteil gar nicht das verschwendete CO₂, da dieses recht kostengünstig ist. Vielmehr ist es der etwa dreifach erhöhte Massenstrom durch die dünnen Aluminiumröhrchen, was natürlich einen deutlich erhöhten Druckabfall und somit auch einen Temperaturabfall zur Folge gehabt hätte. Um dieses Problem zu vermeiden, wurde eine herkömmliche CO₂ Steigrohrflasche verwendet und in einem handelsüblichen Gefrierschrank aufbewahrt. Damit kann das CO₂ bis maximal -37 °C heruntergekühlt werden. Somit wurde das Problem der Vorkühlung vermieden und die gesamte Verdamp-

fungsenthalpie steht - von kleinen Verlusten durch Wärmeeintrag in die Verbindungsleitungen abgesehen - zur Kühlung des Prototyps zur Verfügung. Somit wurde auch der Verbrauch an CO_2 deutlich reduziert, was ein allzu häufiges Wechseln der CO_2 -Flasche vermeidet. Direkt auf der Steigrohrflasche befindet sich ein Druckminderer, der den Druck des flüssigen CO_2 auf den gewünschten Wert reduziert. Durch die Kühlung der Flasche im Gefrierschrank ist sichergestellt, dass das CO_2 auch bei dem niedrigeren Druck nach dem Druckminderer zum größten Teil in der flüssigen Phase verbleibt. Das flüssige, druckreduzierte CO_2 durchströmt nun den Prototyp, wo es zu großen Teilen verdampft. Am Ausgang des Prototyps sind ausreichend lange, thermisch nicht isolierte Leitungen montiert, was sicherstellt, dass kein flüssiges CO_2 in die nun folgenden Flowmeter gelangen kann. Mittels dieser Flowmeter kann die zweite vorhandene Variable, der CO_2 -Durchfluss, gesteuert werden. Vom Ausgang der Flowmeter führt eine Leitung direkt aus dem Fenster um eine Ansammlung von CO_2 im Labor zu vermeiden.

5.6 Ergebnisse

Nachfolgend sollen verschiedene Ergebnisse der Messungen dargestellt werden. Es wird sich zeigen, dass die Kühlleistung des vorhandenen Prototyps mehr als ausreichend dimensioniert ist. Eine weitere Reduktion der Materialmenge, das heißt des Rohrquerschnitts, ist also ohne weiteres möglich, was die Attraktivität dieser Lösung weiter steigert.

5.6.1 Qualität der Isolationsbox

Als erstes wurde der Wärmeeintrag der Umgebung, also die Güte der Isolierung, untersucht. Dazu wurde ein kleiner Fluss an flüssigem CO_2 gewählt und die gesamte Anordnung ohne elektrische Heizung abgekühlt. In den folgenden Schritten wurde der CO_2 Fluss sehr langsam und mit großen Wartezeiten zwischen den Flussänderungen immer weiter reduziert, bis es schließlich zu einem Dry-Out am Ausgang der Kühlröhrchen des Prototypen kam. Dieser Dry-Out ist nicht sehr deutlich, da die parallele Verlegung der Kühlröhrchen auf beiden Seiten dazu führt, dass der Ausgang des Rückführröhrchens (Punkt D und H in Abbildung 5.1.3) durch den Eingang des parallelen Röhrchens (Punkt A und E) mitgekühlt wird. Bei einem Dry-Out kommt es also zunächst nicht zu einem starken Ansteigen der Temperatur. Aus diesem Grund wurde der Dry-Out anfangs nicht erkannt und der Durchfluss und somit die Kühlleistung weiter reduziert. Dies führt dann dazu, dass sich der Ort des Dry-Out von Punkt D und H immer weiter Richtung Punkt C und G verschiebt. Erreicht er diese Punkte, wird auf jeder Seite nur noch ein Röhrchen direkt vom CO_2

gekühlt. Eine weitere Reduktion des Durchflusses führt dazu, dass der Dry-Out schließlich Punkt B und F erreicht. Ist dies der Fall, so erfolgt an den Punkten B und C sowie F und G überhaupt keine Kühlung mehr und die Temperatur steigt stark an. Nachdem dieser Sachverhalt verstanden war, konnte der Beginn des Dry-Out an den Punkten D und H bestimmt werden. Es ist dazu nur nötig genauer (etwa 2-3°C) auf die Temperaturänderungen zu achten, da schon ein minimaler Anstieg der Temperatur einen Dry-Out signalisiert. Mittels der recht genauen Temperaturmessung ist dies problemlos möglich. Aus der Größe des CO₂ Durchflusses kann nun, unter Vernachlässigung des Wärmeeintrags der isolierten Verbindungsleitung zwischen Eisschrank und Prototyp sowie bekannter Verdampfungsenthalpie des CO₂, die notwendige Kälteleistung in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt werden, die einen Dry-Out gerade noch verhindert. Der so erhaltene Wert wurde verifiziert, indem die gesamte Anordnung ohne Kühlung mit verschiedenen elektrischen Heizleistungen erwärmt wurde. In allen Fällen ergaben sich vergleichbare Ergebnisse, so dass man als Endergebnis eine thermische Leitfähigkeit der kompletten Isolationsanordnung von etwa $1,8 \frac{W}{K}$ erhält. Das entspricht einer von außen zugeführten Wärmeleistung von 108 Watt bei einer Temperatur von -40°C.

Je nach eingestellter Temperatur kommt zu der elektrischen Heizung also ein nicht unerheblicher Beitrag durch den Wärmeeintrag der Umgebung hinzu, der berücksichtigt werden muss.

5.6.2 Simulation der Halteblöcke

Da an einem realen Detektor, anstatt der Heizplatinen, Silizium-Sensoren und Ausleseelektronik auf den Halteblöcken montiert wären, ist es notwendig den Temperaturabfall im Halteblock zu kennen. Dazu wurde dieser mittels der Software Comsol Multiphysics simuliert. Bei der Simulation wurde angenommen, dass die halbrunde Auflagefläche des Halteblocks, welche sowohl im thermischen als auch im elektrischen Kontakt mit den Kühlröhrchen steht, auf einer konstanten Temperatur gehalten wird. Die Randbedingungen bei der Auflagefläche der Heizplatinen ist ein konstanter Wärmeeintrag von 1 Watt. Dies bedeutet also eine Heizleistung von 2 Watt pro Heizplatine, da jede davon mittels zwei Halteblöcken gekühlt wird. Die restlichen Oberflächen wurden in der Simulation als thermisch von der Umgebung isoliert angenommen, was den realen Verhältnissen im späteren Tracker recht genau entsprechen sollte. Der Tracker wird komplett gekühlt sein, so dass kein zusätzlicher Wärmeeintrag an den Halteblöcken erfolgen wird. Wie man in Abbildung 5.6.10 erkennen kann, spielt die Temperaturdifferenz zwischen Auflagefläche der Kühlröhrchen und der Auflagefläche der Heizplatine mit 0,056°C nur eine sehr untergeordnete Rolle. Dies gilt natürlich nur unter der Voraussetzung eines perfekten thermischen Kontakts zu Kühlröhrchen und Heizplatine, welcher in der Praxis

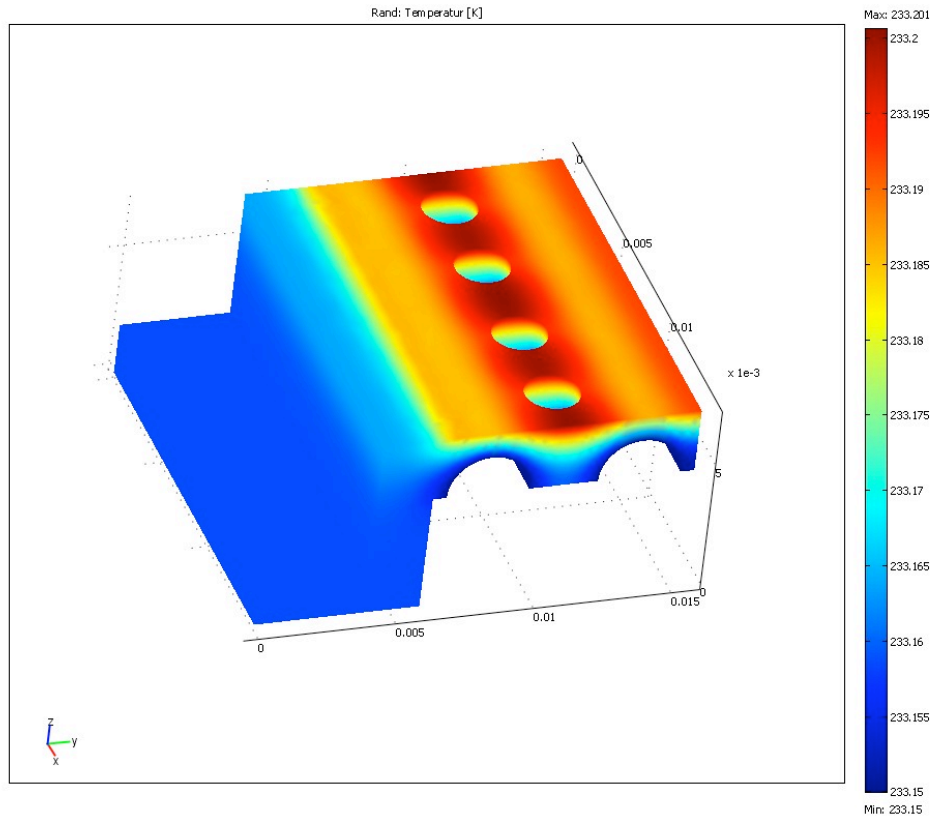


Abbildung 5.6.10: *Simulation des Halteblocks bei fester Temperatur an den beiden halbrunden Auflageflächen der Kühlröhrchen und konstantem Wärmeeintrag an der Auflagefläche der Heizplatinen.*

natürlich nie gegeben sein kann. Trotzdem war es während den Messungen mit den verwendeten Pt1000 Class B Sensoren (Genauigkeit $\pm 0,5^\circ\text{C}$) nicht möglich einen Temperaturunterschied zwischen Auflagefläche der Heizplatine und Kühlröhrchen zu ermitteln, was für einen recht guten thermischen Kontakt zwischen Kühlröhrchen und Halteblock spricht.

5.6.3 Gemessene Spannungsabfälle des Systems

Gemessen wurde der Spannungsabfall, das heißt die an jeder Heizplatine anliegende Spannung. Da immer zwei Platinen am gleichen Punkt befestigt sind, ergibt dies nur $56/2=28$ Messwerte. Gemessen wurde bei einer Versorgungsspannung von 2 Volt, so dass die Ergebnisse in Abbildung 5.6.11 direkt mit der Simulation in Abbildung 5.2.7 verglichen werden können. Im Vergleich

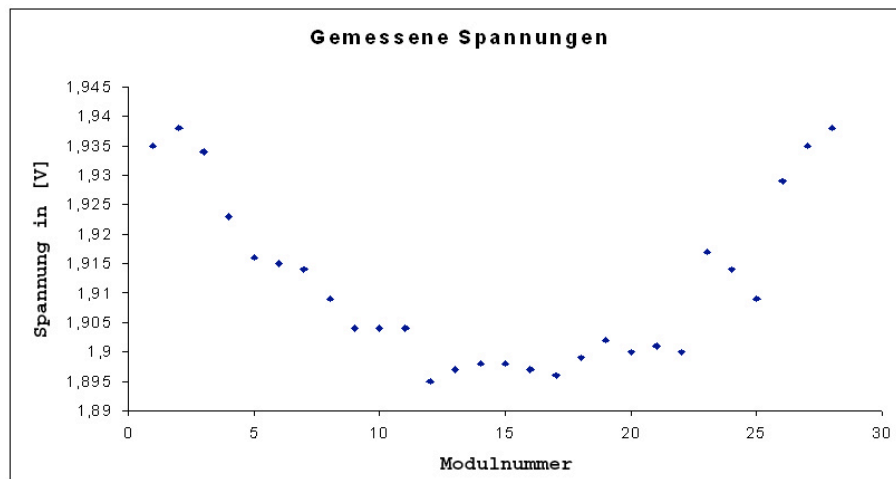


Abbildung 5.6.11: Messung der Spannungen an den Heizplatinen bei einem Gesamtstrom von 22,4A und einer Temperatur von -40°C . Die maximale Differenz zwischen den verschiedenen Heizplatinen liegt bei 43mV.

mit Abbildung 5.2.7 wird sofort deutlich, dass Simulation und Messung der maximalen Spannungs Differenz zwischen den Heizplatinen um mehr als eine Größenordnung auseinander liegen. Man könnte zunächst vermuten, diese Diskrepanz rühre von Unterschieden in der Leitfähigkeit zwischen Simulation und realem Material. Dies wurde jedoch überprüft, indem mit einem leistungsfähigen Netzteil ein Strom von 20A durch einzelne Aluminiumstrukturen (Röhrchen und Stromschienen) geleitet und der dabei auftretende Spannungsabfall gemessen wurde. Das Aluminium wies dabei im Rahmen der Messgenauigkeit stets den erwarteten Widerstand auf. Ein Problem mit der Leitfähigkeit des Aluminiums kann also ausgeschlossen werden. Die Schwierigkeit liegt vielmehr an den Kontaktstellen der einzelnen Teile, aus denen der Prototyp zusammengebaut ist. Die zwei Aluminiumröhrchen auf beiden Seiten sind zwar durchgängig ohne Kontaktstelle, nicht aber die Stromschienen, welche beidseitig angebracht sind. Durch die Eigenschaft des Aluminiums an der Luft schnell eine sehr schlecht leitende Oxidschicht zu bilden, entstehen nicht zu vernachlässigende Übergangswiderstände. Diese Übergangswiderstände sind auch noch von Kontaktstelle zu Kontaktstelle verschieden, da sie von der genauen Oberflächenbeschaffenheit und des Anpressdrucks der Verschraubung abhängig sind und so von Verbindung zu Verbindung variieren. Dieses Pro-

blem kann leicht umgangen, beziehungsweise reduziert werden, indem man das Aluminium leitfähig beschichtet. Als Oberflächenbehandlung bietet sich beispielsweise das Chromatieren an. Die durch das Chromatieren entstehende Oberflächenschicht mit Chromanteil ist so dünn, dass sie bezogen auf das Materialbudget keinen nennenswerten Beitrag liefert und von diesem Gesichtspunkt aus problemlos eingesetzt werden kann.

5.6.4 Abkühlung von Raumtemperatur

Im Diagramm 5.6.12 ist der typische Temperaturverlauf aufgetragen, der sich ergibt, wenn die Anordnung von Raumtemperatur beginnend von flüssigem CO₂ durchströmt und somit abgekühlt wird. Dabei ist darauf zu achten, dass

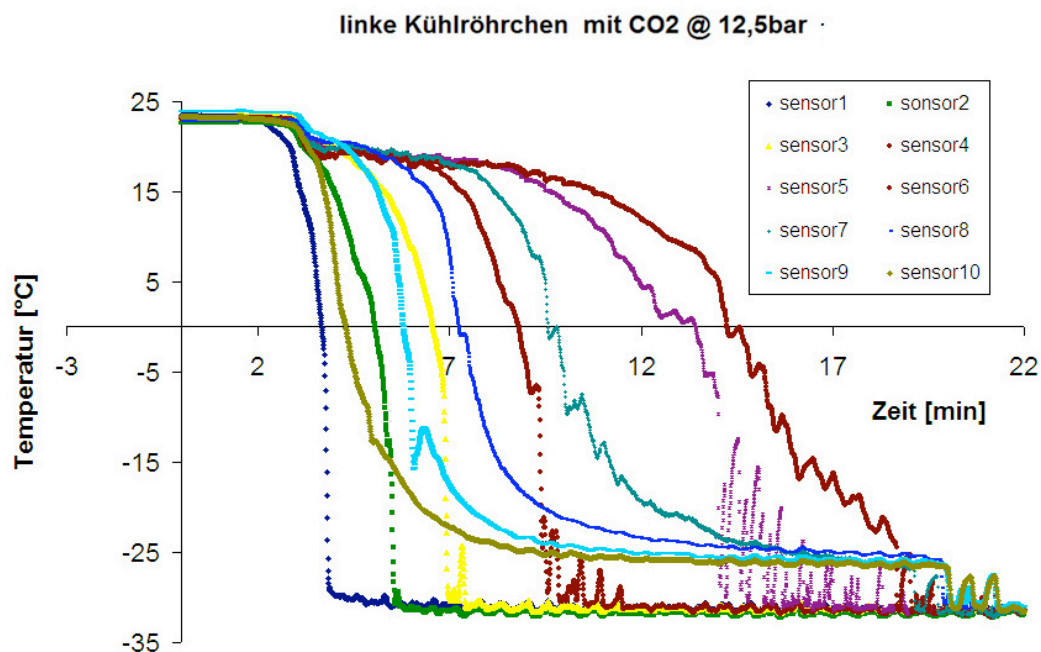


Abbildung 5.6.12: Temperaturkurven der 10 Pt1000 Sensoren über der Zeit. Wie man sehen kann kühlen sich die einzelnen Sensoren nicht nach ihrer Position am Kühlröhrchen entsprechenden ab, sondern werden durch die parallele Auslegung der Kühlleitungen zum Teil durch die zweite Leitung mitgekühlt

der Durchfluss in den ersten Sekunden nach dem Einschalten nicht zu groß ist, da es ansonsten zu einer Trockeneisbildung innerhalb des auf der CO₂-Flasche befestigten Druckminderers kommt und dieser dadurch verstopft. Dieser Effekt rührt daher, dass sich im Moment des Aufdrehens des CO₂ Ventils kein Gegendruck in den Zuleitungen sowie in den Kühlröhrchen befindet. Das vorgekühlte CO₂ wechselt, wie in Abbildung 4.1.1 zu sehen ist, in den festen Zustand. Wird die Durchflussmenge klein genug gewählt, so reicht die Wärmekapazität an der Verstopfungsstelle aus, um das CO₂ zu verdampfen

und ein Verstopfen zu verhindern. Nach einigen Sekunden hat sich der am Druckminderer eingestellte Druck im System aufgebaut und der Durchfluss kann nach Belieben gewählt werden.

Wie man sehen kann, wird zunächst Sensor 1 abgekühlt. Der nächste Sensor, der von flüssigem CO₂ erreicht wird ist Sensor 2. Jedoch zeigt der Temperaturverlauf in Abbildung 5.6.12 zunächst eine Temperaturverminderung von Sensor 10 an. Der Grund dafür liegt in der parallelen Auslegung der Kühlröhrchen auf jeder Seite. Wie in Abbildung 5.1.3 zu sehen ist, liegen sich Sensor 1 und 10 exakt gegenüber, so dass eine Abkühlung von Sensor 1 auch stets zu einer Abkühlung von Sensor 10 führt. In Abbildung 5.6.12 ist zu erkennen, dass das Gleiche auch für die Sensorpaare 2 und 9, 3 und 8, 4 und 7 sowie 5 und 6 gilt. Ebenfalls gut zu erkennen ist, dass sich die zunächst indirekt mitgekühlten Sensoren 10,9,8,7 und 6 nicht bis auf die Siedetemperatur des CO₂ von etwa -30°C abkühlen, sondern etwa 5°C darüber bleiben. Erst wenn auch sie von flüssigem CO₂ erreicht werden, kühlen sie sich vollständig ab. Diese Abkühlung erfolgt dann verhältnismäßig schnell und auch für alle Sensoren näherungsweise gleichzeitig, da nur noch wenig Wärme abgeführt werden muss um die CO₂ Siedetemperatur zu erreichen. Diese indirekten Mitkühlung des parallelen Röhrchens bietet zum Beispiel den Vorteil, dass auf diese Art thermische Spannungen innerhalb der Röhrchen vermindert werden. Ohne diese Mitkühlung des parallelen Röhrchens käme es zu einem Punkt, bei dem sich eines der zwei durch die Halteblöcke verbundenen Röhrchen auf Raumtemperatur und das zweite auf CO₂ Temperatur befinden würde. Durch die Längenkontraktion beim Abkühlen entstünden so mechanische Spannungen innerhalb der Röhrchen. Diese Spannungen könnten eventuell zu einem Versagen der Röhrchen selbst oder zu einer überhöhten mechanischen Belastung der später montierten Siliziumsensoren führen. Die parallele Auslegung bietet außerdem weitere Vorteile bei einem eintretenden Dry-Out der Leitung, was an späterer Stelle gezeigt wird.

5.6.5 Temperaturregelung

Die Temperaturregelung in einem 2-Phasen CO₂-System ist verhältnismäßig einfach möglich, da die Siedetemperatur direkt an den Druck im System gekoppelt ist. Dadurch kann über den verhältnismäßig einfach zu regelnden Druck die gewünschte Temperatur bestimmt werden. In Abbildung 5.6.13 sind zur Übersichtlichkeit nur die Temperaturkurven von drei Sensoren aufgetragen. Die restlichen sieben Sensoren zeigen ein komplett analoges Verhalten. Wie zu erkennen ist, folgt die Temperatur recht schnell dem eingestellten Druck beziehungsweise dessen Änderung. Was auffällt, sind die kurzen Spitzen in der Temperatur bei Änderung des Druckes. Dies lässt sich wie folgt erklären. Am Ausgang des Systems sind an beiden Kühlröhrchen lange Schläuche angebracht, welche an dem jeweiligen Flowmeter enden. Dies dient dazu sicher

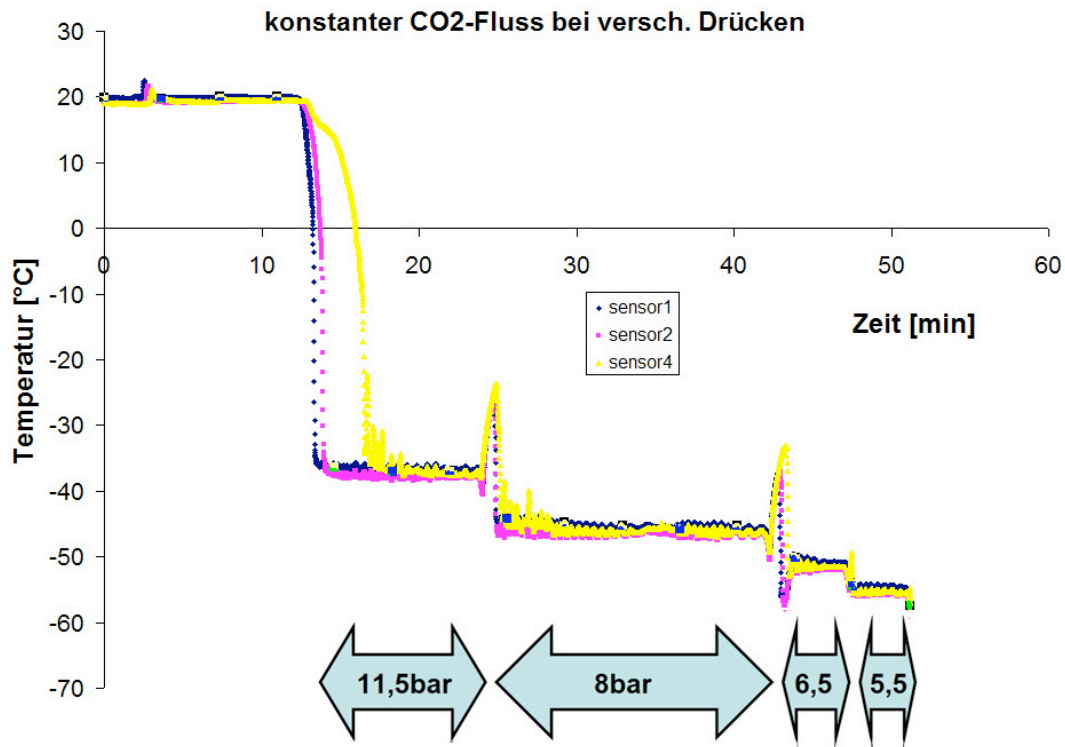


Abbildung 5.6.13: Temperaturregelung über den Druck im System. Durch den CO₂ Druck ist dessen Siedetemperatur eindeutig festgelegt, was es erlaubt über eine Druckänderung im System die Temperatur zu bestimmen. Solange sich flüssiges CO₂ im System befindet, wird über den Druck die gewünschte Temperatur gehalten. Dies funktioniert auch wenn der Wärmeeintrag in das System schwankt, wie es zum Beispiel bei unterschiedlichen Temperaturen durch unterschiedlich großen Wärmeeintrag aus der Umgebung der Fall ist.

zu stellen, dass das komplette CO₂ durch Wärmeeintrag aus der Umgebung verdampft und aufgewärmt wird, bevor es die Flowmeter erreicht. Der Fluss von flüssigem CO₂ könnte mittels dieser Flowmeter nicht bestimmt werden, da sie auf Gas ausgelegt sind. Außerdem könnte es durch die tiefen Temperaturen zu Beschädigungen am Glaszylinder der Flowmeter kommen. In den Kühlröhrchen und den anschließenden Schläuchen ist nun eine gewisse Menge gasförmigen CO₂s enthalten, welches sich bei einer Verminderung des Einstelldrucks am Druckminderer zunächst entspannt und an Volumen zunimmt. Diese Volumenvergrößerung verhindert es zunächst, dass flüssiges CO₂ aus dem Druckminderer in das System eintreten kann. Es kommt kurzzeitig zu einer Unterversorgung mit flüssigem CO₂ und die Temperatur steigt an. Ist der Überdruck schließlich abgebaut und gelangt wieder flüssiges CO₂ in das Kühlsystem, wird sehr schnell die eingestellte Temperatur angenommen und gehalten. Wie man sieht, funktioniert das System bis hinunter zu einem Druck von 5,5 bar und damit einer Temperatur von etwa -55°C problemlos. Dies liegt

schon sehr nahe am Tripelpunkt (siehe Abbildung 4.1.2), der bei einem Druck von 5,11 bar und einer Temperatur von $-56,35^{\circ}\text{C}$ liegt und die theoretisch erreichbare Grenze markiert. Unterhalb dieser Marke liegt CO_2 in fester Form vor und würde das System verstopfen.

Der umgekehrte Fall, bei dem der Druck und damit die Temperatur mit der Zeit erhöht wird, kann mit diesem System nicht oder nur sehr langsam getestet werden. Dies würde nämlich dazu führen, dass bei einer Druckerhöhung das CO_2 auf dem Weg durch das nun unterkühlte System nicht verdampfen würde und so bis zu den Flowmetern gelangen könnte. Die Länge der Aufwärmschläuche ist für diesen Fall zu kurz bemessen.

5.6.6 Dry-Out

Ist ab einer bestimmten Stelle im Kühlröhrchen das flüssige CO_2 komplett verdampft, so steht an allen nachfolgenden Punkten im Röhrchen keine Kühlleistung mehr zur Verfügung. Lediglich das kalte Gas wird noch ein wenig Wärme abtransportieren können, was aber für eine ausreichende Kühlung nicht genügen kann. In Abbildung 5.6.14 ist der Temperaturverlauf über der Zeit dargestellt, der sich ergibt, wenn die Heizleistung der Platinen Schritt für Schritt bei einem CO_2 -Fluss von je $0,75\text{kg/h}$ und einem Druck von 12,5 bar in beiden Röhrchen erhöht wird. Man kann erkennen, wie bei zunehmender Heizleistung die Temperatur einiger Sensoren deutlich ansteigt. Andere hingegen bleiben kalt. Bereits bei der kleinsten elektrischen Heizleistung von insgesamt 17 Watt, zu der jedoch noch eine Leistung von etwa 90 Watt durch den Wärmeeintrag aus der Umgebung hinzukommt, kann man kleine Spitzen in Abbildung 5.6.14 erkennen. Diese Spitzen liegen an den Punkten 8, 9 und 10 (siehe Abbildung 5.1.3) und damit an dem Ende des Kühlröhrchens. Dieser zeitweise Dry-Out erhöht die Temperatur jedoch nur leicht, da er zum einen nicht dauerhaft auftritt und zum anderen weil die Punkte 8 bis 10 durch das parallele Röhrchen mitgekühlt werden. Erhöht man die elektrische Heizleistung auf 44 Watt, so kann man erkennen, dass die Anzahl der Spitzen sowie deren Höhe deutlich zunehmen. Es sind aber nach wie vor nur die Sensoren an den Punkten 8 bis 10 betroffen. Die zeitliche Breite der Temperaturspitzen hat nun ebenfalls deutlich zugenommen, da es bei dieser Heizleistung bereits zu längerem Aussetzen der Versorgung mit flüssigen CO_2 kommt. Wird die Heizleistung nun abermals erhöht und auf 84 Watt eingestellt, so sieht man, dass an den Punkten 8-10 ein dauerhafter Dry-Out vorliegt. Die Temperaturen an diesen Stellen liegen jedoch auch bei 84 Watt Heizleistung nicht deutlich über denen bei 44 Watt, da sie nach wie vor durch die Punkte 1 bis 3 mitgekühlt werden. Den größten Anstieg erkennt man an den Punkten 5 und 6. Erreicht der Dry-Out Punkt 5, so wird dieser nicht mehr gekühlt und kann somit auch Punkt 6 nicht mehr mitkühlen. Dies führt zu einem starken Anstieg der Temperatur dieser beiden Punkte. Abbildung 5.6.15 zeigt denselben Sachverhalt wie Abbildung 5.6.14, nur dass hier der Durchfluss um einen Faktor zwei auf

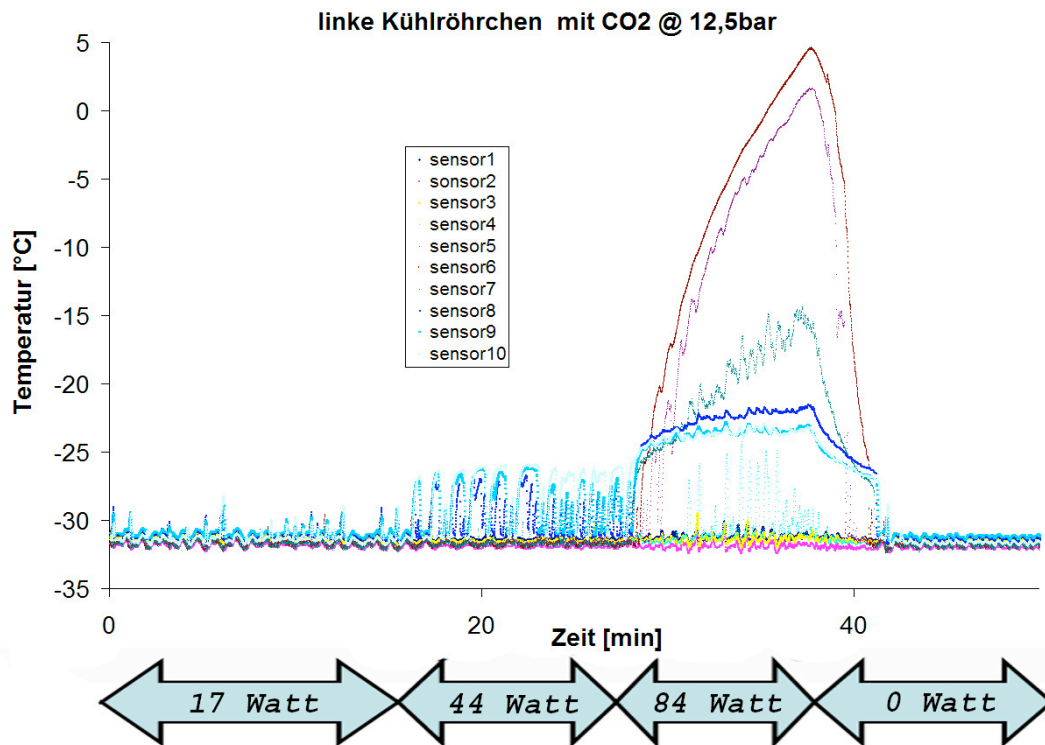


Abbildung 5.6.14: Temperaturverlauf der Sensoren bei einem CO_2 -Fluss von $0,75 \text{ kg/h}$, einem Druck von $12,5 \text{ bar}$ und zunehmender elektrischer Heizleistung. Deutlich ist zu erkennen, wie die Temperatur einiger Sensoren, bei einer Gesamtheizleistung von 17 sowie 44 Watt kurzzeitig leicht ansteigt. Erst bei einer Heizleistung von 84 Watt kommt es zu einem größeren Anstieg, da nun eines der parallelen Röhrchen gar nicht mehr, das andere nur noch teilweise, von flüssigem CO_2 versorgt wird.

je $1,5 \text{ kg/h}$ bei ebenfalls $12,5 \text{ bar}$ erhöht wurde. Durch den vergrößerten Fluss ist es natürlich möglich eine deutlich größere Wärmeleistung abzuführen, so dass der Dry-Out erst bei etwa 180 Watt elektrischer Heizleistung einsetzt und bei einer Leistung von etwa 230 Watt den Punkt 5 erreicht, was wieder in einem starken Temperaturanstieg resultiert. In der Art und Weise wie ein Dry-Out eintritt, liegt ein Vorteil der parallelen Auslegung der Röhrchen auf beiden Seiten des Prototyps. Kommt kurzfristig oder auch für länger Zeit kein flüssiges CO_2 am Ende der Kühlröhrchen an, so resultiert dies nicht unmittelbar in einem sehr starken punktuellen Anstieg der Temperatur. Vielmehr wird der Anstieg begrenzt und beträgt bei der Konstruktionsweise dieses Prototyps nur etwa 5°C . Erkauft wird diese Begrenzung damit, dass sich die Temperaturerhöhung dafür auf einen größeren Bereich erstreckt.

Variiert man die Größe des CO_2 Flusses und markiert die Gesamtleistung (elektrische Heizleistung und Isolationsverluste), bei der ein beginnender Dry-Out einsetzt, so kann man erkennen, dass zwischen Kühlleistung und Durch-

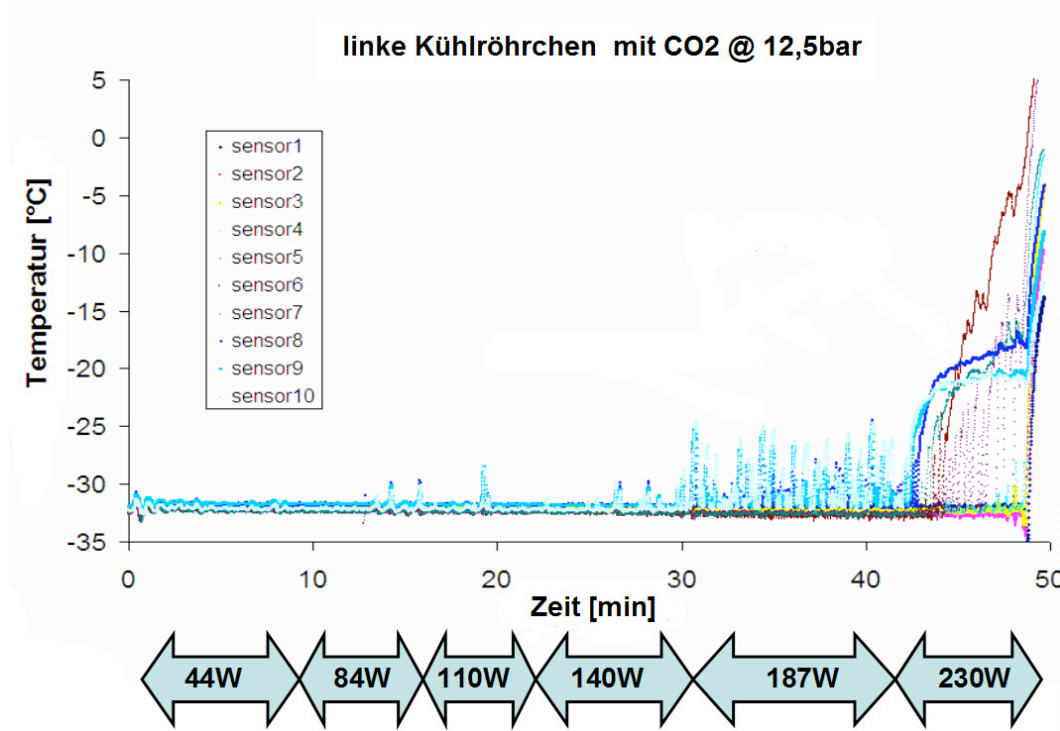


Abbildung 5.6.15: Temperaturverlauf der Sensoren bei einem CO_2 -Fluss von $1,5 \text{ kg/h}$, einem Druck von $12,5 \text{ bar}$ und zunehmender elektrischer Heizleistung. Im Vergleich zu Abbildung 5.6.14 ist eine deutliche Vergrößerung der maximalen Kühlleistung zu erkennen. Erst bei etwa 180 Watt elektrischer Heizleistung kommt es zu einem einsetzenden Dry-Out. Bei 230 Watt ist kommt es zu einem größeren Anstieg, da nun eines der parallelen Röhrchen gar nicht mehr, das andere nur noch teilweise, von flüssigem CO_2 versorgt wird.

fluss ein recht linearer Zusammenhang besteht (Abbildung 5.6.16). Dies ist nicht unmittelbar klar, da es bei einem zu großen, lokalen Wärmeeintrag auch dazu kommen kann, dass sich an den Wärmeeintragsstellen in die Röhrchen eine isolierende Gasschicht zwischen flüssigem CO_2 und Innenwand der Röhrchen bildet. Tritt dies auf, so würde eine Vergrößerung des Flusses lediglich dazu führen, dass mehr flüssiges CO_2 am Ende ungenützt aus den Röhrchen austritt, nicht aber zu einer Vergrößerung der Kühlleistung. Der CO_2 Fluss konnte nicht weiter gesteigert werden, da bei insgesamt 3 kg/h die maximale Durchflussmenge der Flowmeter erreicht war.

5.6.7 Druckabfall

Durch die hervorragenden Eigenschaften von CO_2 treten in dem getesteten System nur sehr kleine Druckabfälle auf. Mittels der, am Druckminderer der CO_2 -Flasche sowie am Ausgang der Kühlröhrchen, montierten Monometer war kein Druckunterschied feststellbar, da die Messgenauigkeit der verwendeten Mano-

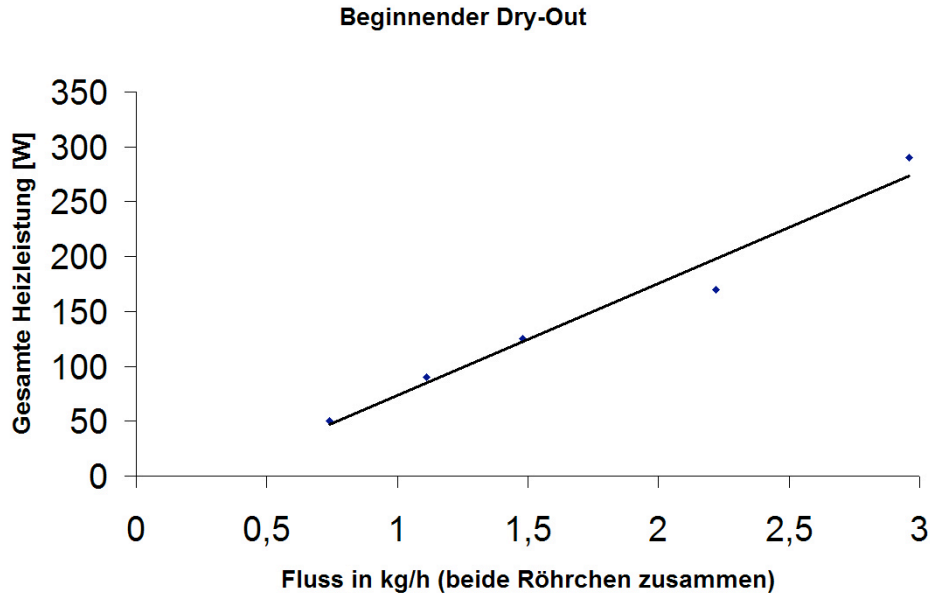


Abbildung 5.6.16: *Maximal abführbare Wärmeleistung über CO_2 -Fluss. Man kann erkennen, dass die maximal abführbare Wärmeleistung (elektrische Heizung sowie Wärmeeintrag durch die Umgebung) recht linear mit dem CO_2 -Fluss in den Kühlröhrrchen ansteigt. Eine Begrenzung oder ein Sättigungseffekt ist nicht erkennbar, so ist zu vermuten, dass sich dieses Verhalten mit den verwendeten Rohrquerschnitten zu noch größeren Flüssen extrapolieren ließe.*

meter hierfür bei weitem nicht genügte. Die zweite Möglichkeit den Druckabfall zu bestimmen liegt darin, die Temperaturunterschiede zwischen Eingang und Ausgang der Kühlröhrrchen zu bestimmen. Dieses Verfahren führte jedoch auch nicht zu den gewünschten Erfolg, da die verwendeten PT1000 Class B Sensoren bei -40°C bereits eine Abweichung von $\pm 0,5^\circ\text{C}$ aufweisen. Zu dieser Ungenauigkeit der Sensoren addiert sich noch der Fehler der USB-Auslese, welche nicht genau bekannt ist, jedoch in einem ähnlichen Bereich liegen dürfte.

Aufgrund dieser Ungenauigkeiten war kein exakter, abfallender Verlauf der Temperatur über die Länge der Kühlleitung feststellbar. In Abbildung /ref-Druckabfall ist die, über eine Minute gemittelte, Temperatur, bei einem CO_2 -Fluss von $1,5 \text{ kg/h}$ pro Röhrrchen, einem Druck von $12,5 \text{ bar}$ sowie einer Gesamtheizleistung von 134 Watt über der Rohrlänge dargestellt. Die Heizleistung teilt sich jedoch auf die rechten und linken Röhrrchen auf, so dass der Wärmeeintrag pro Röhrrchen nur 67 Watt beträgt. Im Gegensatz zu dem erwarteten Abfall, zeigt die eingezeichnete Ausgleichsgerade eher ein Ansteigen der Temperatur. Da ein Temperaturanstieg über die Rohrlänge ausgeschlossen werden kann, bietet Abbildung 5.6.17 keine Grundlage für eine Bestimmung des Druckabfalls. Wenn überhaupt, so ist nur eine sehr grobe Abschätzung der oberen Grenze des Druckabfalls möglich, indem man die maximal auftretende Temperaturdifferenz von $0,61^\circ\text{C}$ in einen Druckunterschied übersetzt. Dies er-

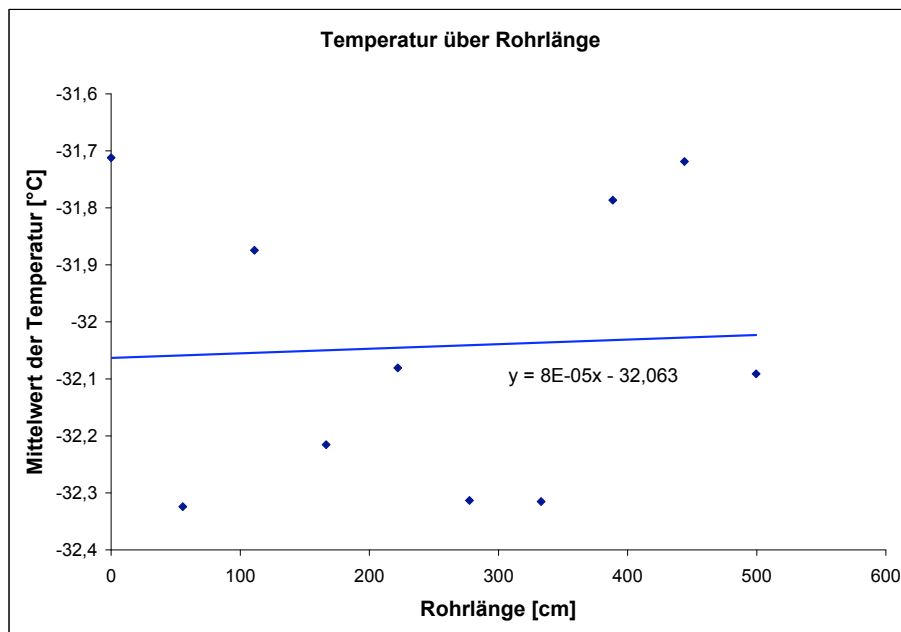


Abbildung 5.6.17: Zeitlich gemittelte Temperatur (1 min.) über Rohrlänge, bei einem CO_2 -Fluss von 1,5kg/h, einem Druck von 12,5 bar sowie einem Wärmeeintrag von 67 Watt. Die einzelnen Mittelwerte weisen eine große Streuung aufgrund von Ungenauigkeiten der Pt1000-Sensoren sowie der USB-Auslese auf. Die Ausgleichsgerade zeigt entgegen der Erwartung ein Ansteigen der Temperatur.

gibt $\Delta P = 0,29\text{bar}$ über die ganze Leitungslänge, was einen guten und immer noch tolerablen Wert darstellt.

5.7 Nächste Schritte

Mit dem getesteten Prototyp ist es möglich, eine sehr große Wärmeleistung abzuführen. Tatsächlich war der begrenzende Faktor nicht etwa der Druckabfall, der zu einer Temperaturdifferenz zwischen Eingang und Ausgang geführt hätte, sondern vielmehr die Flowmeter, die Bauartbedingt keinen größeren Fluss zuließen. Da die erforderliche Kühlleistung im späteren Detektor sehr viel kleiner sein würde, als die mit dem Prototyp mögliche, erscheint es daher logisch die Querschnitte der verwendeten Kühlröhrchen in einem nächsten Schritt deutlich zu reduzieren, um weiteres Material einzusparen sowie eine noch bessere Spannungscompensation zu erreichen. Weiteres Material kann durch die Verwendung deutlich kleinerer Halteblöcke zwischen den Röhrchen und den Modulen eingespart werden, da auch die daran auftretenden Temperaturdifferenzen sehr klein und weit unter einem tolerablen Grenzwert liegen, was sowohl Simulation als auch die Messung deutlich gezeigt haben. Erste Muster der verkleinerten Halteblöcke sind bereits durch die mechanische Werkstatt

angefertigt worden; die zugehörigen technischen Zeichnungen sind im Anhang zu finden. Wie stark die Verkleinerung ausgefallen ist, kann man sehr schön in Abbildung 5.7.18 erkennen.

Das derzeitige Kühlsystem, welches das CO₂ nach der einmaligen Benutzung

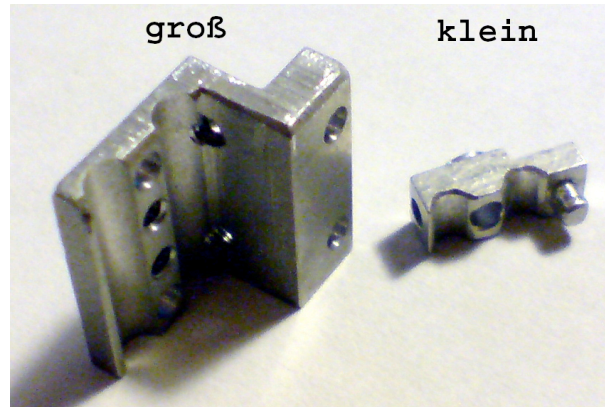


Abbildung 5.7.18: Vergleich der großen, bei den Messungen verwendeten Halteblöcke, mit den neuen, deutlich kleineren.

aus dem Fenster abführt, sollte ebenfalls durch ein geschlossenes System ersetzt werden, um auf der einen Seite CO₂ einzusparen und um, was viel wichtiger ist, näher an der Realität eines eventuellen realen Systems zu sein. Nur mit einem geschlossenen System ist es beispielsweise möglich die Stabilität über längere Zeiträume sowie Effekte, wie sie beim Ein- und Ausschalten auftreten können, zu untersuchen sowie Erfahrung in Betrieb und Umgang eines realen Systems zu erlangen. Wichtige Punkte sind in diesem Zusammenhang die Auswirkungen auf Systemdruck, Füllstände, Flüssigkeitsverteilung und Strömungstopologien, die bei einem Einschalten oder Verändern der Wärmelast beziehungsweise bei Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit auftreten können. Auch hierzu existieren bereits konkrete Pläne. Ein solches System wird sich sehr grob an dem bei LHCb verwendeten orientieren, jedoch auf den aufwendig zu kontrollierenden und schwierig zu regelnden Akkumulator verzichten. Stattdessen wird zur Druckregulierung ein herkömmlicher Druckminderer zum Einsatz kommen, mit dem bei dem vorhandenen System sehr gute Erfahrungen gemacht worden sind. Auch soll es die Möglichkeit bieten einmal im System befindliches CO₂ wieder zurück in die Druckgasflasche zu befördern. Diese Fähigkeit wird es deutlich erleichtern, Umbauten und Änderungen im System vorzunehmen und reduziert außerdem den Bedarf an CO₂. Eine vorläufige Skizze eines eventuellen Aufbaus ist in Abbildung 5.7.20 gezeigt. Nach dem Kondensator, der mittels eines externen Systems gekühlt wird, befindet sich eine Membranpumpe, welche zur Untersuchung und Auslotung der Grenzen sowohl in Durchflussmenge als auch im Druck geregelt werden kann. Außerdem ist die Pumpe durch ihre Bauweise unempfindlich gegenüber Kavitation, die nur zu einer verminderten Pumpleistung, nicht aber zu einer Zerstörung der Pumpe, führt. Dies ist beim

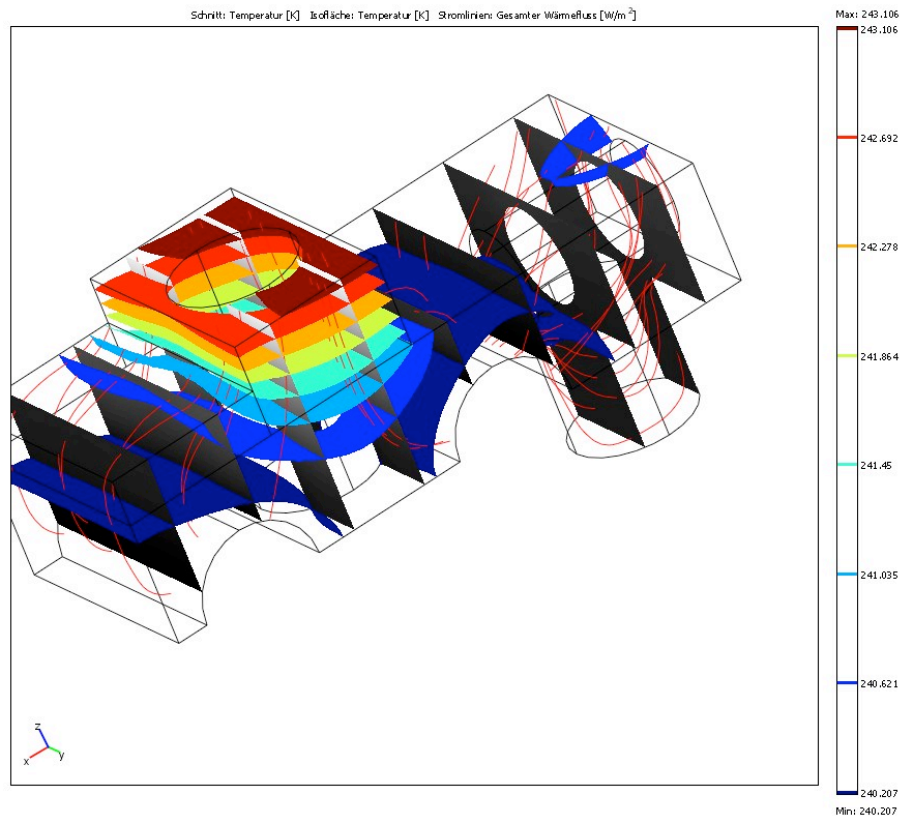


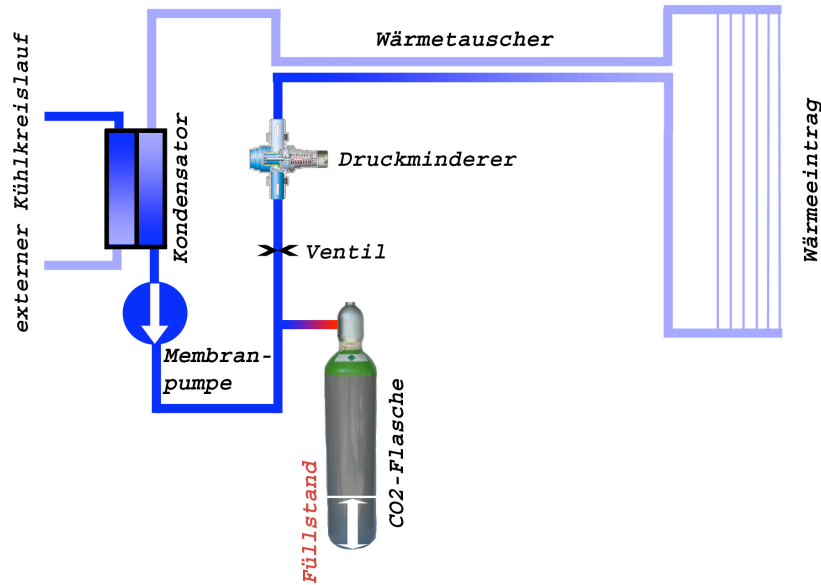
Abbildung 5.7.19: *Simulation der verkleinerten Halteblöcke. Die farbigen, gekrümmten Flächen geben die Temperaturisoflächen an. Die roten Linien zeigen die Richtung des Temperaturgradienten und die schwarzgrauen, ebenen Flächen sind äquidistante Schnitte durch den Modellkörper. Im Vergleich zu den großen Verbindungsblöcken ist die maximale Temperaturdifferenz mit etwa 3° C relativ gesehen sehr viel größer. Absolut gesehen ist es aber noch immer ein guter Wert der eventuell ausreichend ist.*

Experimentieren mit verschiedenen Parametern ein sehr großer Vorteil und vermeidet kostspielige Reparaturen und Ausfallzeiten. Nach der Pumpe folgt ein Druckminderer sowie ein Ventil, was dazu dient, zwischen Füllung und Betrieb sowie Rückführung des CO₂ in die Druckgasflasche umzuschalten. Daran schließt sich eine Art Wärmetauscher an, der entweder aus einer coaxialen Leitung oder zwei einfachen parallelen Leitungen mit thermischen Kontakt untereinander bestehen kann. Nach dem Druckminderer, der den Druck der Pumpe auf den gewünschten Wert reduziert und so die Temperatur bestimmt, wird sich das CO₂ direkt am Phasenübergang befinden und die Wärmelast durch Verdampfen aufnehmen können. Nun tritt das CO₂ wieder in die coaxiale beziehungsweise parallele Leitung ein, wo wieder ein kleiner Teil kondensiert und damit das unterkühlte CO₂ auf dem Hinweg bis fast zur Phasengrenze aufwärmt. Nun wird das CO₂ im Kondensator verflüssigt und unterkühlt und der Kreislauf beginnt von Neuem. Um ein solches System zu befüllen, sollte

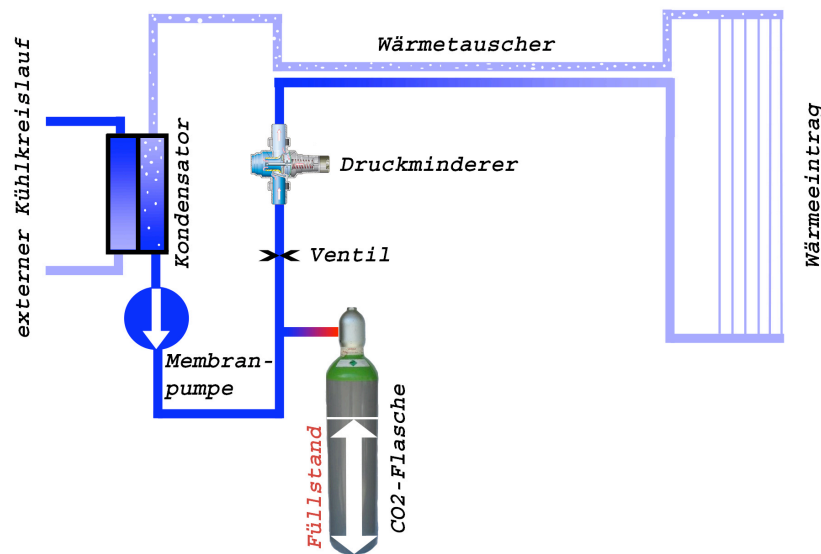
es ausreichen, die Gasflasche zu öffnen und die Pumpe einzuschalten. Es muss keine Füllmenge bestimmt oder eingehalten werden, da sich das System von selbst, stets mit der richtigen Menge CO_2 aus der Gasflasche versorgt. Nach dem öffnen der Flasche wird zunächst gasförmiges CO_2 in das evakuierte System eintreten und sich am Kondensator verflüssigen. Sobald die Pumpe von flüssigem CO_2 erreicht wird, wird sie beginnen dieses zu fördern und die Leitungen kühlen sich ab. Ist das ganze System mit flüssigem CO_2 gefüllt, wird kein weiteres Gas aus der Vorratsflasche mehr nachströmen. Der Druck zwischen Pumpe und Druckminderer entspricht also dem Dampfdruck von CO_2 bei Raumtemperatur. Kommt es nun zu einem externen Wärmeeintrag (der Detektor wird hochgefahren), so wird ein Teil des CO_2 in den Kühlröhrchen sowie der Verbindungsleitung zwischen Wärmeeintrag und Kondensator in die Gasphase wechseln und somit den Druck etwas erhöhen. Diese Druckerhöhung führt dazu, dass der Druckminderer den Fluss reduziert beziehungsweise ganz sperrt. Da die Pumpe weiterläuft, erhöht sich nun der Druck nach der Pumpe etwas und überschüssiges CO_2 wird zurück in die Gasflasche gefördert. Dies bewirkt ein Absinken des Drucks nach dem Druckminderer, so dass dieser wieder weiter öffnet und dadurch auch den Druck zwischen Pumpe und Druckminderer reduziert. Das System läuft nun stabil mit exakt der richtigen Menge an CO_2 und wird die Menge weiterhin an eine veränderte Wärmelast anpassen. Nach dem Abschalten des System würde es sich natürlich auf Raumtemperatur erwärmen und so zu einem Druckanstieg in allen Leitungen, insbesondere auch in den in Abbildung 5.7.20 dargestellten parallelen Leitungen führen. Die diesen Leitungen entsprechenden Rohre im realen CMS-Tracker sind aber nicht in der Lage diesem Druck zu widerstehen und können bei einem Tracker-Update nicht ausgewechselt werden. Es ist daher wichtig diese Druckbeschränkung schon bei einem Testaufbau zu berücksichtigen. Dazu wird das vor dem Druckminderer befindliche Ventil geschlossen, so dass das komplette von der Pumpe geförderte CO_2 zurück in die Gasflaschen fließt. Der Druck kann so bis auf den Dampfdruck des CO_2 bei minimaler Kühlmitteltemperatur der externen Kältemaschine gesenkt werden. Nur in dem kleinen Bereich zwischen Pumpe und Ventil wird auch bei abgeschaltetem System großer Druck herrschen. Da es sich hierbei aber nur um ein sehr beschränktes Volumen handelt, kann dieses auf den hohen Druck ausgelegt werden.

Eine eventuelle Schwierigkeit dieses möglichen Aufbaus besteht in dem hohen Druck, den die Pumpe bei tiefen Temperaturen liefern muss. Der Aufbau einer solchen Pumpe ist in Abbildung 5.7.21 gezeigt. Durch den Motor wird, über eine Exzenterwelle, die Drehbewegung in eine axiale Bewegung des Kolbens umgesetzt. Dieser Kolben erhöht den Druck auf ein spezielles Öl in einem geschlossenen Volumen, was wiederum auf die Membrane wirkt und diese bewegt. Durch die Bewegung der Membrane wird CO_2 durch das Eingangsventil angesaugt und durch das Auslassventil ausgestoßen. Bei tiefen Temperaturen kommt es zu einer Versteifung des Membranmaterials und der Hub und somit die Förderleistung wird reduziert, da die Motorleistung nicht mehr zur

Überwindung des Widerstandes ausreicht, beziehungsweise das pumpeninterne Überdrucksystem anspricht. Innerhalb eines gewissen Rahmens kann dieses Problem durch die Verwendung einer größeren Membran mit weniger Hub aber gleichem Hubraum reduziert werden. Sollte es nicht möglich sein, eine Pumpe mit den benötigten Anforderungen zu erwerben, so könnte die Vorratsflasche zur Drucksenkung im vorhandenen Eisschrank gekühlt aufbewahrt werden. Eine Kühlung auf -12°C würde den Druck bereits auf 25 bar senken. Das Gleiche gilt somit auch für den Druck zwischen Pumpe und Druckminderer und würde die Anforderungen an die Pumpe deutlich reduzieren.



(a) ohne Wärmelast



(b) mit Wärmelast

Abbildung 5.7.20: Schematischer Aufbau des möglichen CO_2 -Kühlungssystems. Die Farben stehen für die Temperatur im laufenden System. Dunkelblau steht für unterkühltes CO_2 , hellblau bedeutet CO_2 an der Phasengrenze und rot bedeutet Raumtemperatur. Oben ist der Zustand des Systems ohne Wärmelast gezeigt. Fast kein gasförmiges CO_2 ist im System und der Füllstand der Gasflasche ist niedrig. Wird die Wärmelast aktiviert, so kommt es zu einem Verdampfen eines Teils der Flüssigkeit. Dieser Zustand ist im unteren Bild gezeigt. Der Druck zwischen Druckminderer und Kondensator steigt an und der Druckminderer drosselt den Fluss. Dies führt dazu, dass der Druck zwischen Pumpe und Druckminderer ebenfalls leicht ansteigt und das überschüssige CO_2 zurück in die Vorratsflaschen gefördert wird, so dass sich ein höherer Füllstand ergibt.

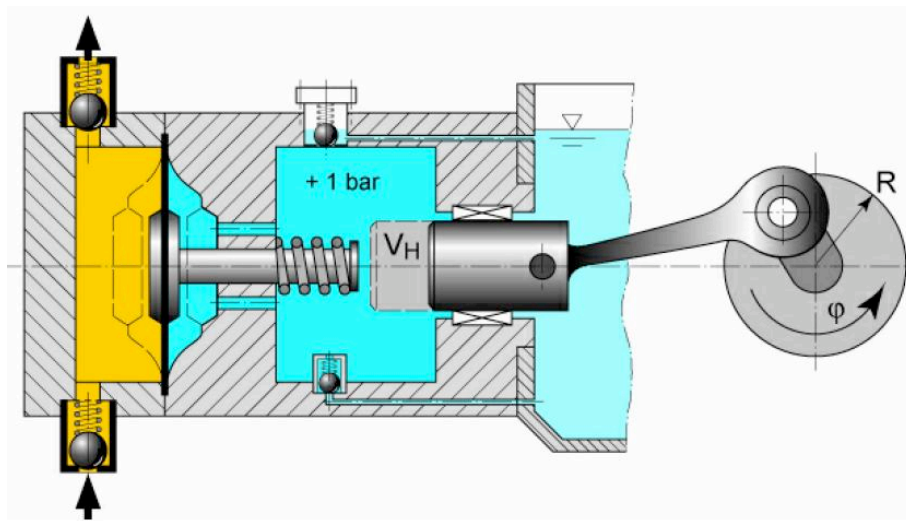


Abbildung 5.7.21: Vereinfachte Darstellung einer Membranpumpe. Über eine Exzenterwelle wird mittels eines Kolbens Druck auf ein Ölreservoir ausgeübt, welches durch die Membrane begrenzt ist. Der Öldruck wird so über die Membrane auf das zu fördernde Medium übertragen, das Auslassventil öffnet und das Medium wird gefördert. Bewegt sich der Kolben zurück, öffnet das Einlassventil, und die Membran wird durch die Feder sowie einen eventuell vorhandenen Vordruck zurück bewegt. [Lew08]

6 Zusammenfassung

Ein mit dem LHC Upgrade einhergehendes Upgrade des CMS-Trackers erfordert einen kompletten Neubau sowie ein neues Design, was in vielen Bereichen Möglichkeiten für Verbesserungen sowie zur Vermeidung begangener Fehler bietet. So erscheint eine Kühlung des SCMS-Trackers mittels eines CO₂-Systems sowie eine Stromversorgung nach dem Schema des getesteten Prototyps angesichts der bereits vielversprechenden ersten Ergebnisse als eine interessante Möglichkeit bei einem zukünftigen SCMS Upgrade das Materialbudget deutlich zu reduzieren. Die idealen Eigenschaften von CO₂ ermöglichen es problemlos, sehr lange und dünne Kühlleitungen zu verwenden, mit denen trotzdem eine sehr große Wärmelast abtransportiert werden kann. Dabei sind nur sehr kleine CO₂-Flüsse notwendig, wodurch, zusammen mit der geringen Viskosität von CO₂, die Druckabfälle sehr klein ausfallen. Dies garantiert, dass an jedem, von der CO₂ Kühlung versorgten Punkt, die gleiche Temperatur herrscht.

Diese Eigenschaft ermöglicht es wiederum eine längere Barrelsektion nach dem Strawman Design zu verwenden und so Anschlüsse für Kühlung und Stromversorgung im sensitiven Volumen des Trackers komplett zu vermeiden, was das Materialbudget beträchtlich reduzieren würde.

Außerdem ist es mit einer CO₂-Kühlung möglich, einen sehr weiten Bereich der Temperatur abzudecken, da sie auch bis hinunter zu tiefen Temperaturen effektiv arbeitet. Des Weiteren wird die Regelung der Temperatur durch den 2-Phasen Charakter eines CO₂-Systems sehr vereinfacht, da sie über den Dampfdruck von CO₂ an den Systemdruck gebunden ist. Diese Eigenschaften könnten es ermöglichen, den SCMS-Tracker bei einer deutlich tieferen Temperatur als heute zu betreiben und so die Leckströme der Siliziumsensoren auch bei erhöhter Strahlungsbelastung, wie sie durch den SLHC zu erwarten ist, in einem erträglichen Bereich zu halten.

Die Kombination von Kühlröhrchen, Stromversorgung und mechanischer Halterung in eine einzige Struktur stellt einen weiteren, wichtigen Punkt dar, der es ermöglichen könnte, das Materialbudget weiter zu reduzieren. Durch einen Stromverlauf, wie der im getesteten Prototypen, werden die auftretenden Spannungsabfälle zu großen Teilen kompensiert, so dass an der Ausleseelektronik jedes Sensors in etwa die gleiche Spannung anliegt. Werden zwei solcher Supermodule nach dem Prinzip des Prototyps in Reihe geschaltet, so liegt der erwartete Strombedarf des SCMS-Trackers in einem vergleichbaren Bereich wie bei dem heutigen Tracker. Dies würde es wiederum ermöglichen, das exis-

tierende Stromversorgungssystem weiter zu verwenden und einen kostspieligen Austausch überflüssig machen.

In weitergehenden Untersuchungen muss dazu geklärt werden, wie sich reale Module verhalten, wenn sie nach dem vorgestellten Schema auf den Kühlleitungen montiert werden und von diesen mit Strom und Kühlleistung versorgt werden. Wichtige Punkte sind hierbei das Rauschverhalten der Module sowie die Frage, inwieweit Schwankungen der Stromaufnahme einzelner Module zu Spannungsschwankungen an den restlichen Modulen führen, beziehungsweise wie diese unterdrückt werden könnten.

Auch auf der Kühlungsseite gilt es noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten. So muss geklärt werden, inwieweit die verwendeten Rohrquerschnitte reduziert werden können, um trotzdem eine zuverlässige Kühlung zu gewährleisten. Des Weiteren sollte ein nächstes Kühlsystem einen geschlossenen Kreislauf besitzen, wie er auch in einem realen System Anwendung finden würde, um auf eventuell auftretende Schwierigkeiten bei Aufbau und Betrieb eines solchen Systems reagieren zu können sowie wertvolle Erfahrungen und mögliche Optimierungsansätze zu gewinnen.

7 Anhang

Technische Zeichnungen von Halteblock_groß, Halteblock_groß Gegenstück, Stromschienen 1-6, Halteblock_klein, und Halteblock_klein Gegenstück.



Abbildung 7.0.1: *Technische Zeichnung Halteblock groß.*



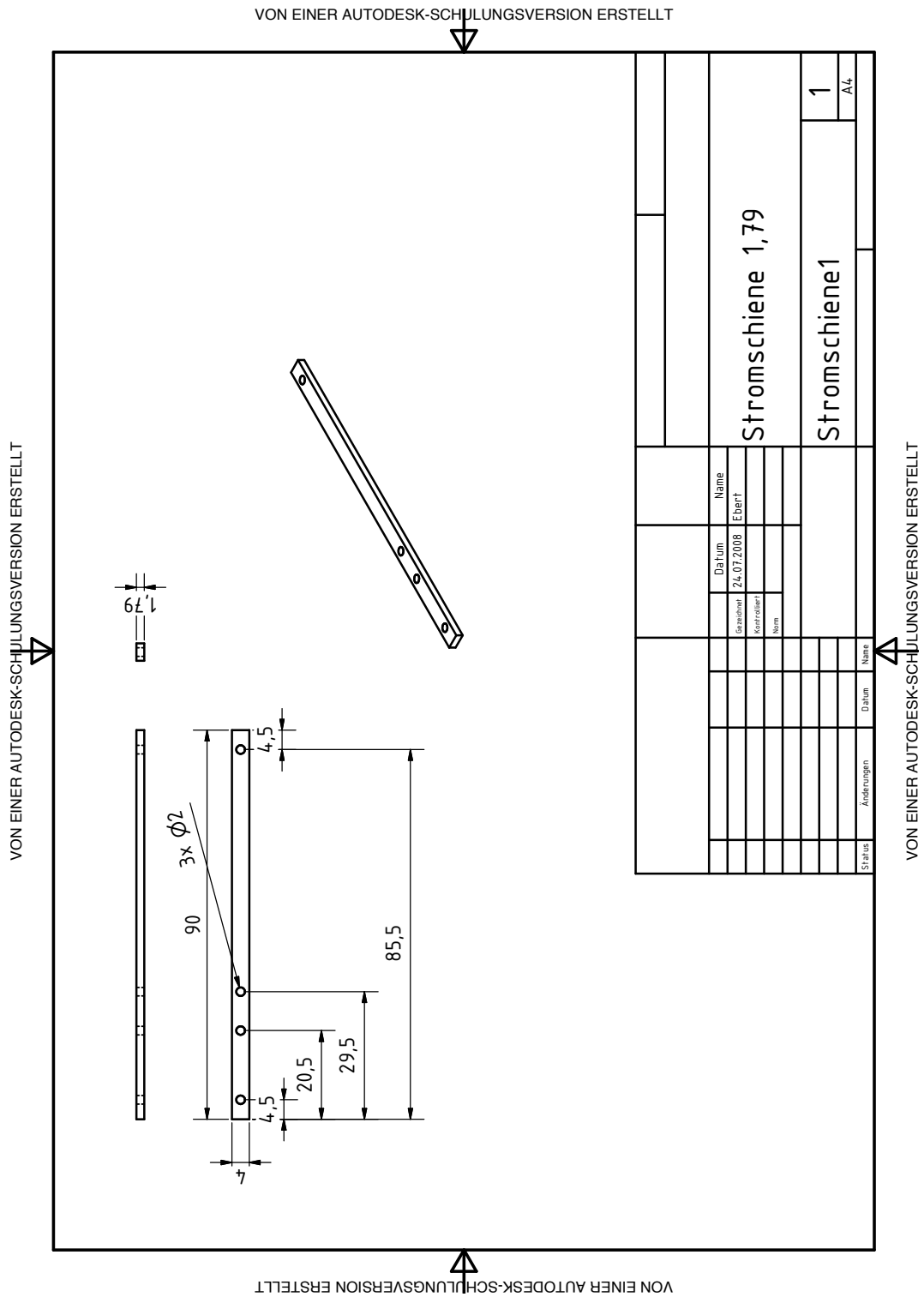


Abbildung 7.0.3: Technische Zeichnung Stromschiene 1,79.

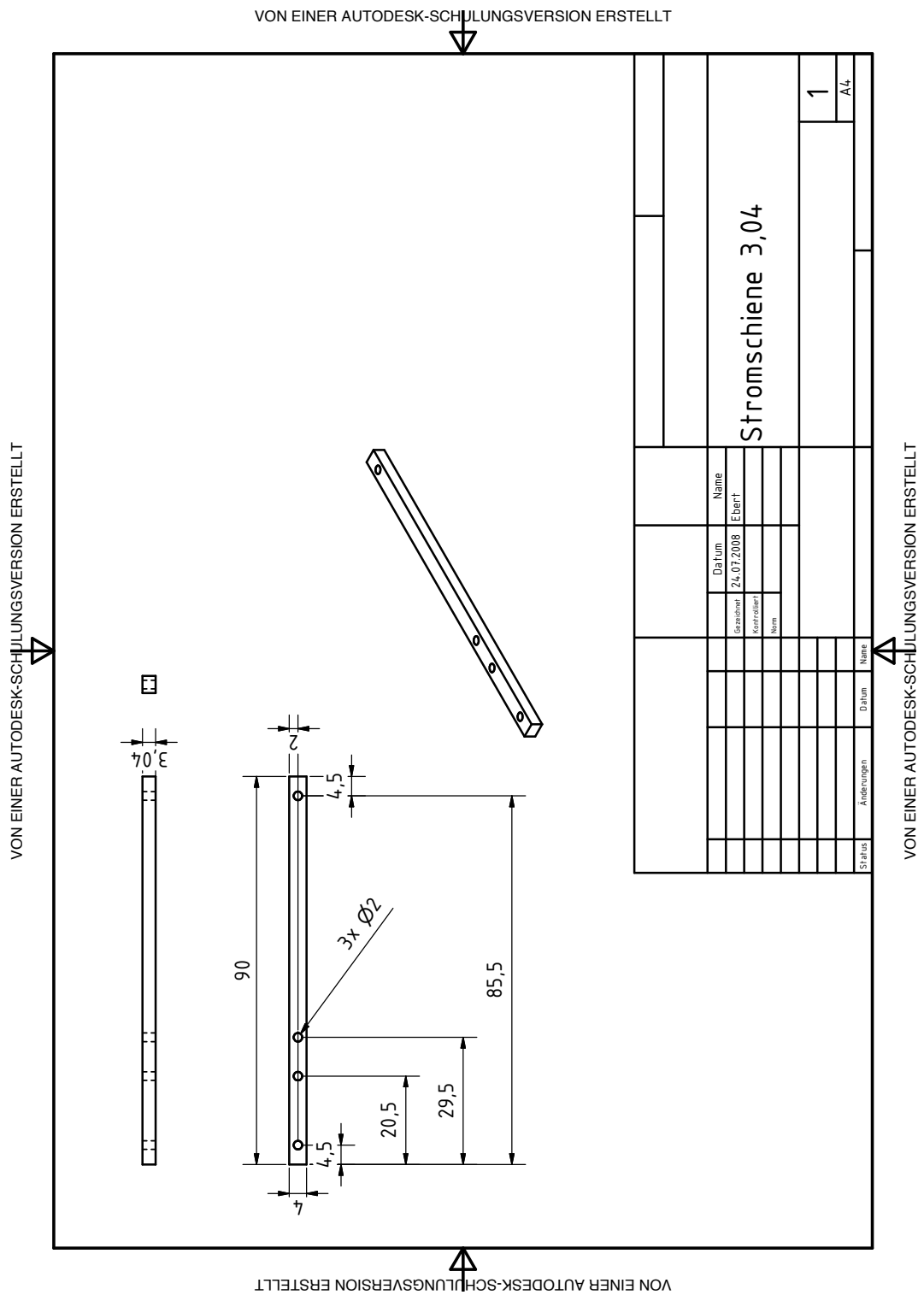


Abbildung 7.0.4: Technische Zeichnung Stromschiene 3,04.

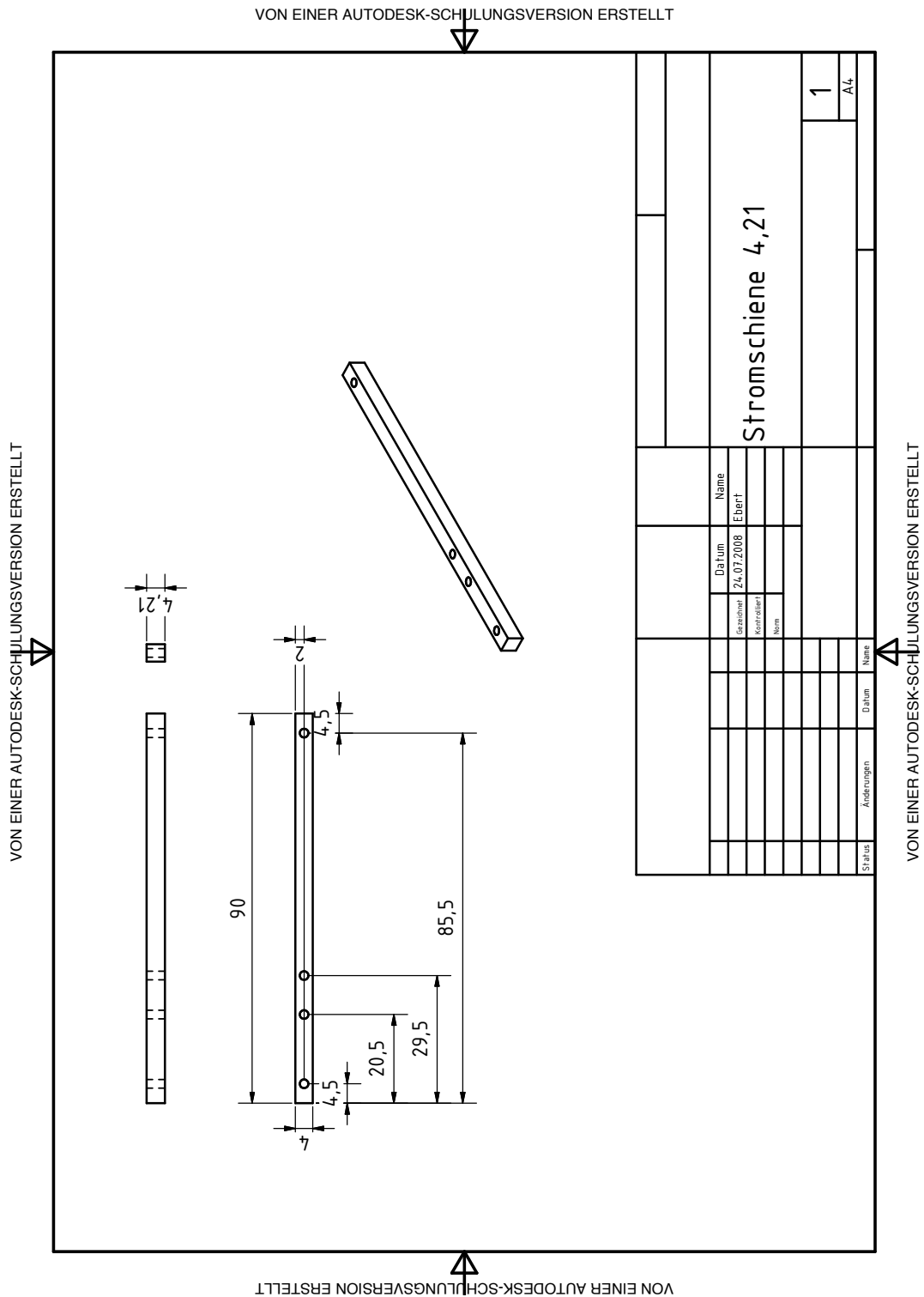
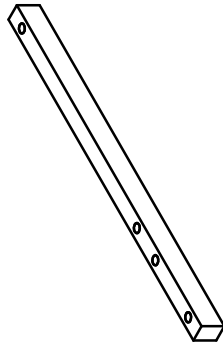


Abbildung 7.0.5: *Technische Zeichnung Stromschiene 4,21.*



本

TH

89

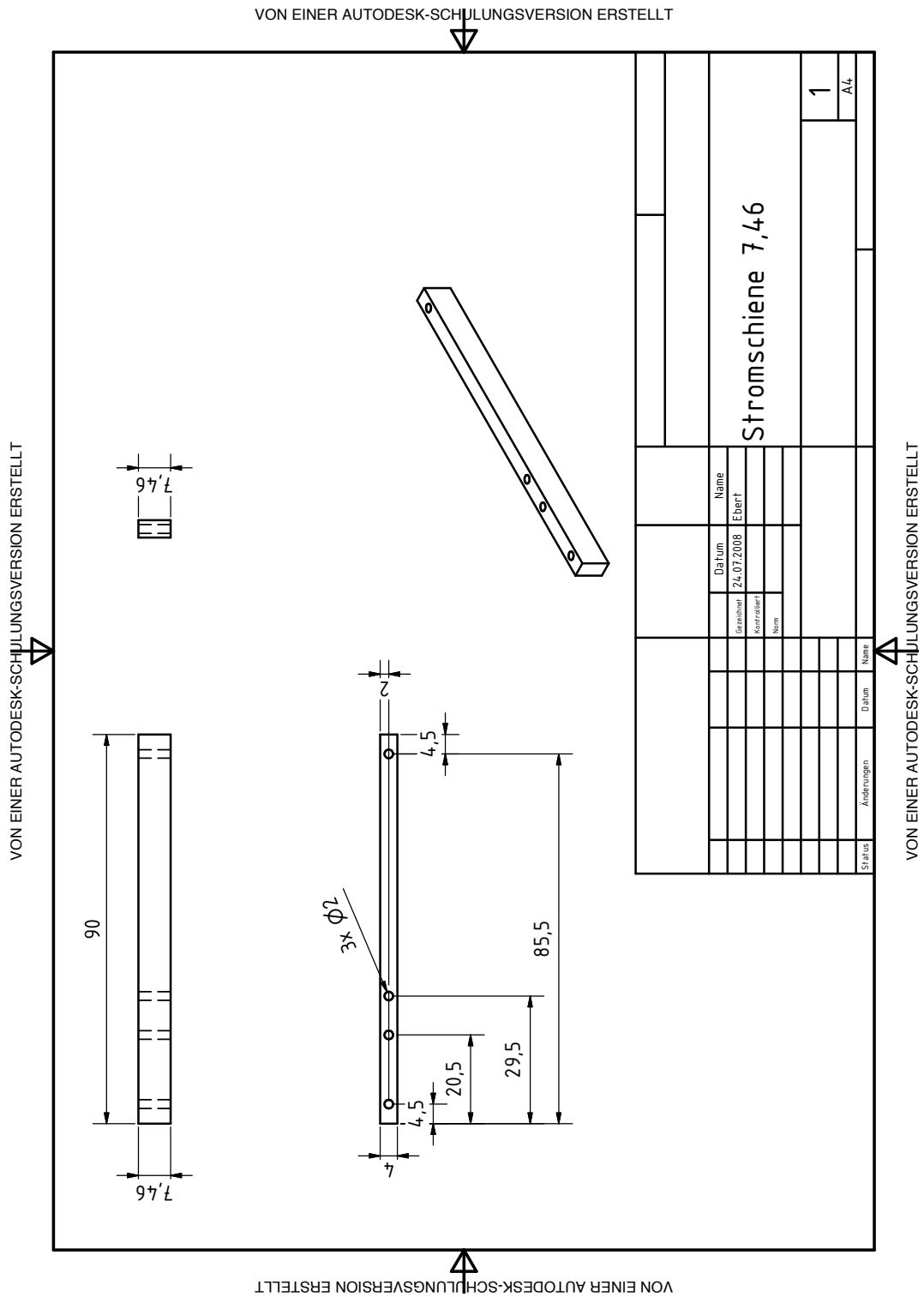
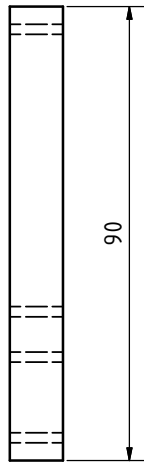
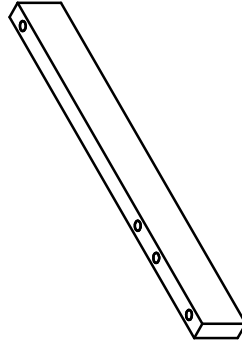
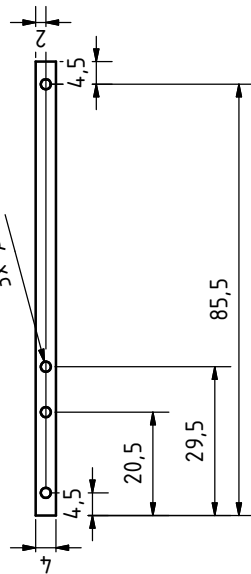


Abbildung 7.0.7: Technische Zeichnung Stromschiene 7,46.


$$\frac{3 \times \phi 2}{}$$


77

91

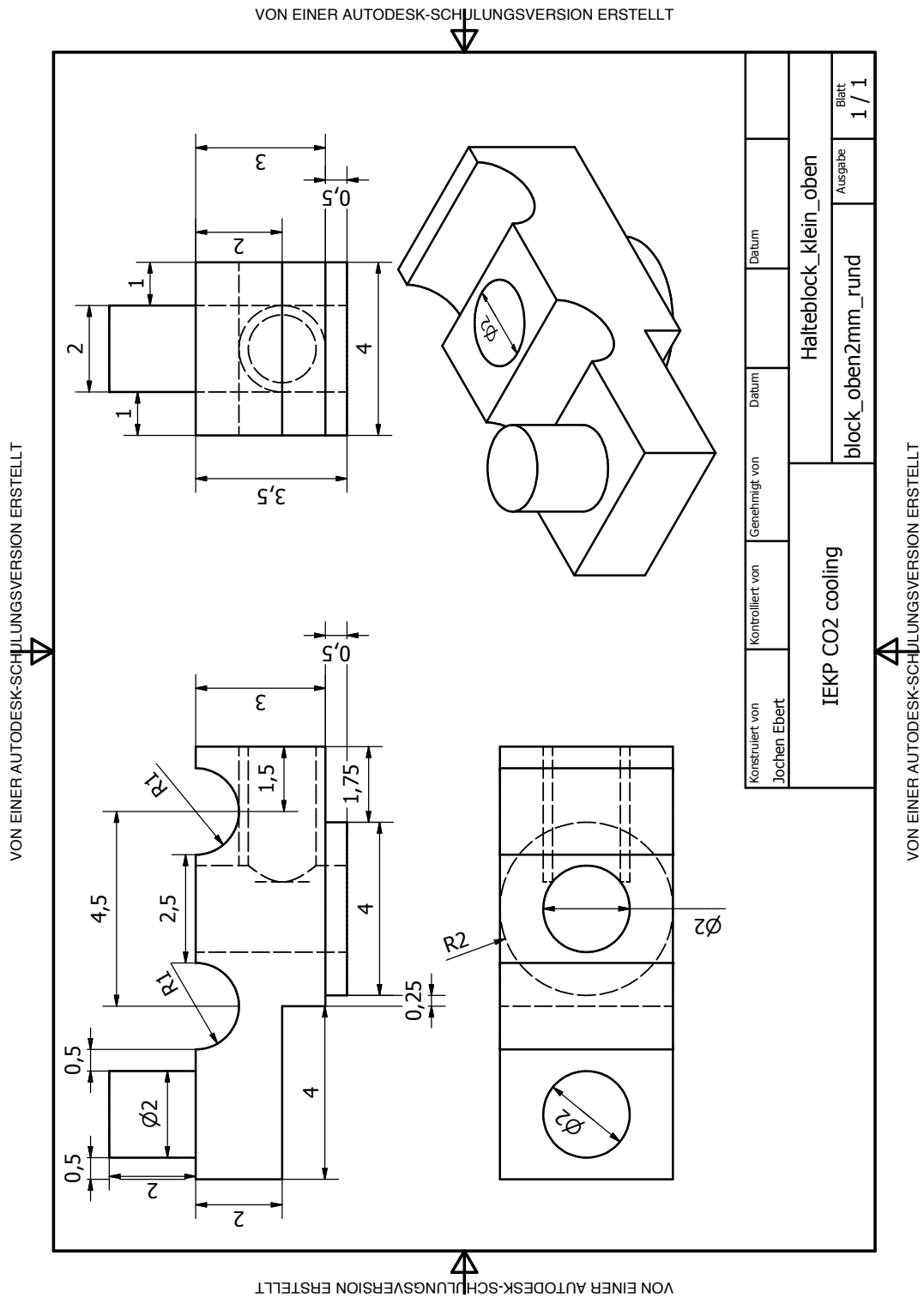


Abbildung 7.0.9: Technische Zeichnung des neuen, verkleinerten Halteblocks.

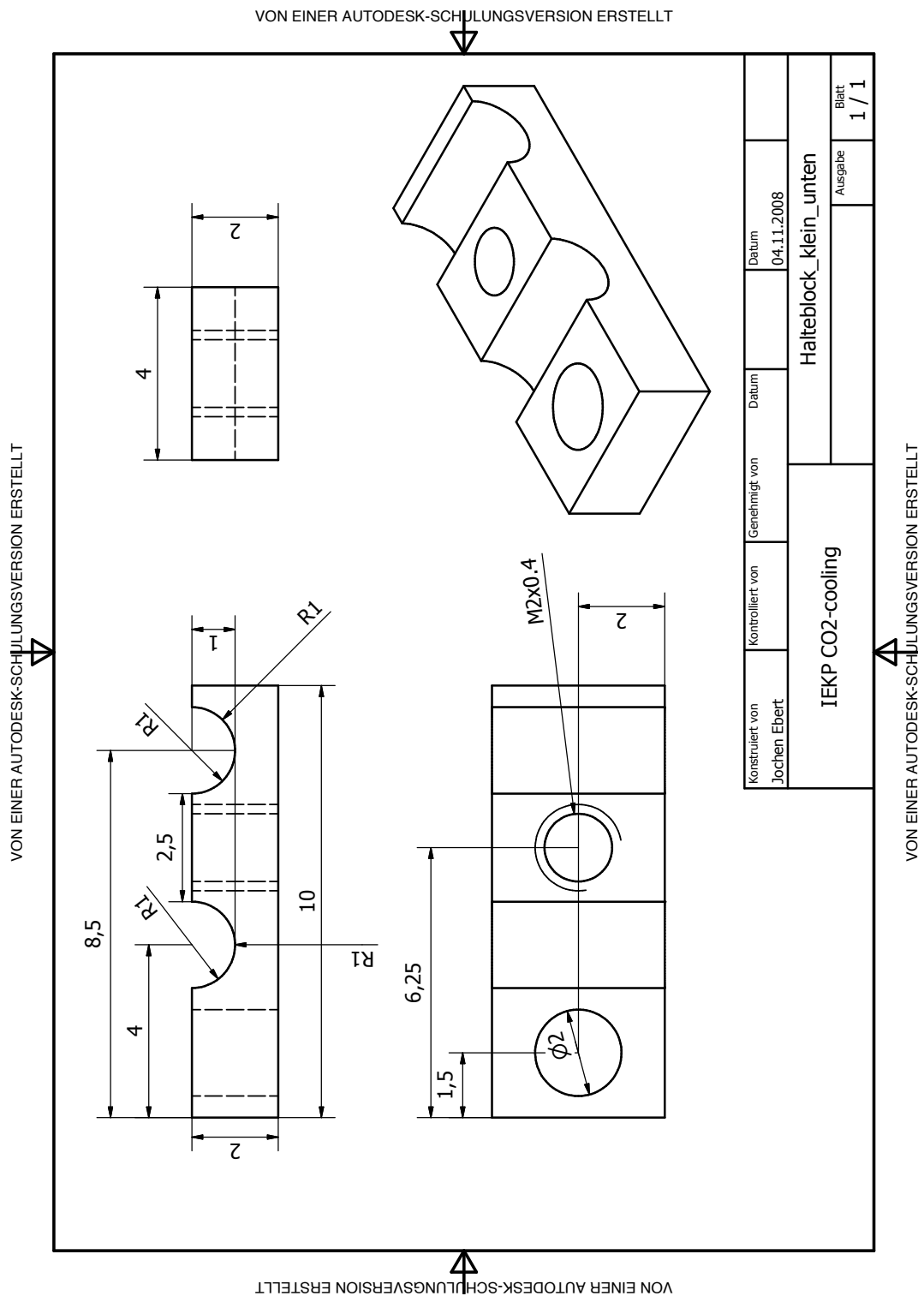


Abbildung 7.0.10: Technische Zeichnung des kleinen Gegenklemmstück.

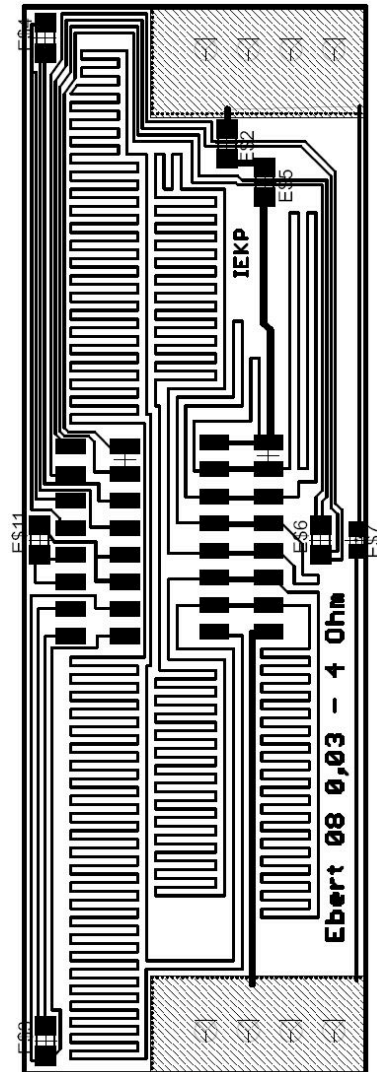


Abbildung 7.0.11: Maske der Heizplatine.

Literaturverzeichnis

- [A.A01] A.A.M.DELIL: Tutorial on Single- and Two-Component Two-Phase Flow and Heat Transfer: Commonality and Difference / National Aerospace Laboratory NLR. 2001. – Forschungsbericht
- [BAPP04] BOCCI, A. ; ALESSANDRO, D. ; PAOLETTI, S. ; PARRINI, G.: The Powering Scheme of the CMS Silicon Strip Tracker. In: *Proceedings of the tenth Workshop on Electronics for LHC and Future Experiments Boston, USA, 13-17 September 2004*, Geneva : CERN, 2004, S. 194–199. – ISBN: 9290832371
- [BE08] BOER, Wim de ; EBERT, Jochen: *Powering via Cooling Pipes: an Optimized Design for an SLHC Silicon Tracker*. November 2008. – Universität Karlsruhe (TH) IEKP , Cern Report number arXiv:0811.2886
- [BLV07] BEUZEKOM, Martin van ; LYSEBETTEN, Ann V. ; VERLAAT, Bart: CO2 cooling experience (LHCb). In: *The 16th International Workshop on Vertex detectors*. Lake Placid, NY, USA : Proceedings of Science, September 2007
- [BRkK06] BALASUBRAMANIAM, R. ; RAME, E. ; KIZITO, J. ; KASSEMI, M.: Two Phase Flow Modeling: Summary of Flow Regimes and Pressure Drop Correlations in Reduced and Partial Gravity / NASA/CR-2006-214085. 2006. – Forschungsbericht
- [Cer06] CERN COMMUNICATION GROUP: *51 Annual Report of the European Organization for Nuclear Research*. 2006. – ISSN: 0304-2901
- [CT96] COLLIER, John G. ; THOME, John R.: *Convective Boiling and Condensation*. Oxford University Press, 1996. – ISBN 0198562969, 9780198562962
- [Fur06] FURGERI, Alexander: *Qualitätskontrolle und Bestrahlungsstudien an CMS Siliziumstreifensensoren*, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe (TH), Diss., Juli 2006. – IEKP-KA/2005-1
- [Goo08] GOODFELLOW CAMBRIDGE LTD.: *Legierung - Elektrische Eigenschaften*. Ermine Business Park, Huntingdon PE29 6WR, England, 2008

- [Han06] HANSEN, Wencke: *Strahlenschäden und Strahlenhärte von Halbleiterdetektoren*. 2006. – RWTH Aachen
- [HSA02] HOLMES-SIEDLE, Andrew G. ; ADAMS, Len: *Handbook of Radiation Effects*. Oxford University Press, 2002. – ISBN 019850733X, 9780198507338
- [Inc06] INCANDELA, Joseph R.: *CMS Tracker for SLHC*. Oktober 2006. – CMS Tracker Upgrade : FNAL Pixel Workshop, University of California Santa Barbara
- [Jes02] JESKE, Markus: *Cooling system for Tracker (TK) and Preshower (SE)*. Januar 2002. – 9th JVOC Meeting, CERN, ST-CV
- [KPMYC02] KAWAHARA, A. ; P. M. Y. CHUNG, M. K.: Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. In: *International Journal of Multiphase Flow, Volume 28, Issue 9* (2002)
- [Kra06] KRAUSE, Michael: *Bestimmung von Mobilität und Lorentzwinkeln in Siliziumstreifensensoren vor und nach Strahlungsschädigung*, Universität Karlsruhe IEKP-KA/2006-18, Diplomarbeit, 2006
- [Lew08] LEWA PUMPS + SYSTEMS: *Lewa ecoflow. Die innovativen Dosierpumpen*. Ulmer Strasse 10 71229 Leonberg, 2008. – D1-600de
- [Mar06] MARINI, Luigi: *Geological Sequestration of Carbon Dioxide: Thermodynamics, Kinetics, and Reaction Path Modeling*. Elsevier, 2006. – ISBN 0444529500, 9780444529503
- [OSLH04] OSEEN-SENDA, K. M. ; LUNDELL, F. ; HILLENBACH, A.: Visualization of Low Heat and Mass Flux Boiling in a Small Metal Pipe Using Neutron Radiography. In: *ASME 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels*, 2004, S. 499–505. – ISBN: 0-7918-4164-2
- [PRDFL99] POSTMA, O. ; ROOKHUIZEN, H. B. ; DOETS, M. ; FERRO-LUZZI, M.: *Preliminary Studies for the LHCb Vertex Detector Cooling System*. 1999. – LHCb note 99-046/VELO
- [Sgu] SGUAZZONI, Giacomo: The construction and commissioning of the CMS Silicon Strip Tracker. In: *34th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2008)*. – CMS CR-2008/063
- [The08a] THE CMS COLLABORATION: THE CERN LARGE HADRON COLLIDER: ACCELERATOR AND EXPERIMENTS - The

- CMS experiment at the CERN LHC. In: *Institute of Physics Publishing and SISSA (IOP Publishing Ltd)* (2008), 14. August
- [The08b] THE LHCb COLLABORATION: The LHCb Detector at the LHC. In: *Institute of Physics Publishing and SISSA (IOP Publishing Ltd)* (2008)
- [Ver08] VERLAAT, Bart: *Development of the Velo Thermal Control System (VTCS)*. 13. März 2008. – National Institute for Particle Physics (NIKHEF) Amsterdam, The Netherlands. CMS Upgrade Meeting Cern/Genf
- [YMMH08] YARIN, L. P. ; MOYSAK, A. ; MOSYAK, A ; HETSRONI, G.: *Fluid Flow, Heat Transfer and Boiling in Micro-Channels*. Springer, 2008. – ISBN 3540787542, 9783540787549

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Referenten Prof. Dr. Wim de Boer für die interessante und abwechslungsreiche Aufgabenstellung sowie die vielen hilfreichen und produktiven Gespräche. Danken möchte ich auch meinem Korreferenten Prof. Dr. Thomas Müller.

Mein weiterer Dank gilt allen Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt, für die zuverlässige Erledigung meiner teils schwierig zu fertigenden Aufträge, sowie die vielen fruchtbaren Gespräche zur Lösung von Fertigungsproblemen.

Frau Schultz möchte ich danken für die stets zuverlässige Beseitigung der zahlreich angefallenen bürokratischen Hürden während meiner Zeit am IEKP.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen des IEKP, Dr. Peter Blüm, Dr. Hans-Jürgen Simonis, Dr. Alexander Dierlamm, Dr. Andreas Sabellek, Dr. Mike Schmanau, Dr. Frank Hartmann, Dr. Guido Dirkes, Steffen Müller, Martin Frey, Karl-Heinz Hoffmann, Pia Steck, Tobias Barvich, Bernd Atz sowie allen Diplomanden während meiner Zeit am IEKP für das freundliche und produktive Arbeitsklima, sowie die vielen hilfreichen Ratschläge und Tipps die ich von allen Seiten während meiner Diplomarbeit erhalten habe.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern, für die Unterstützung während meines Studiums und der Diplomarbeit.