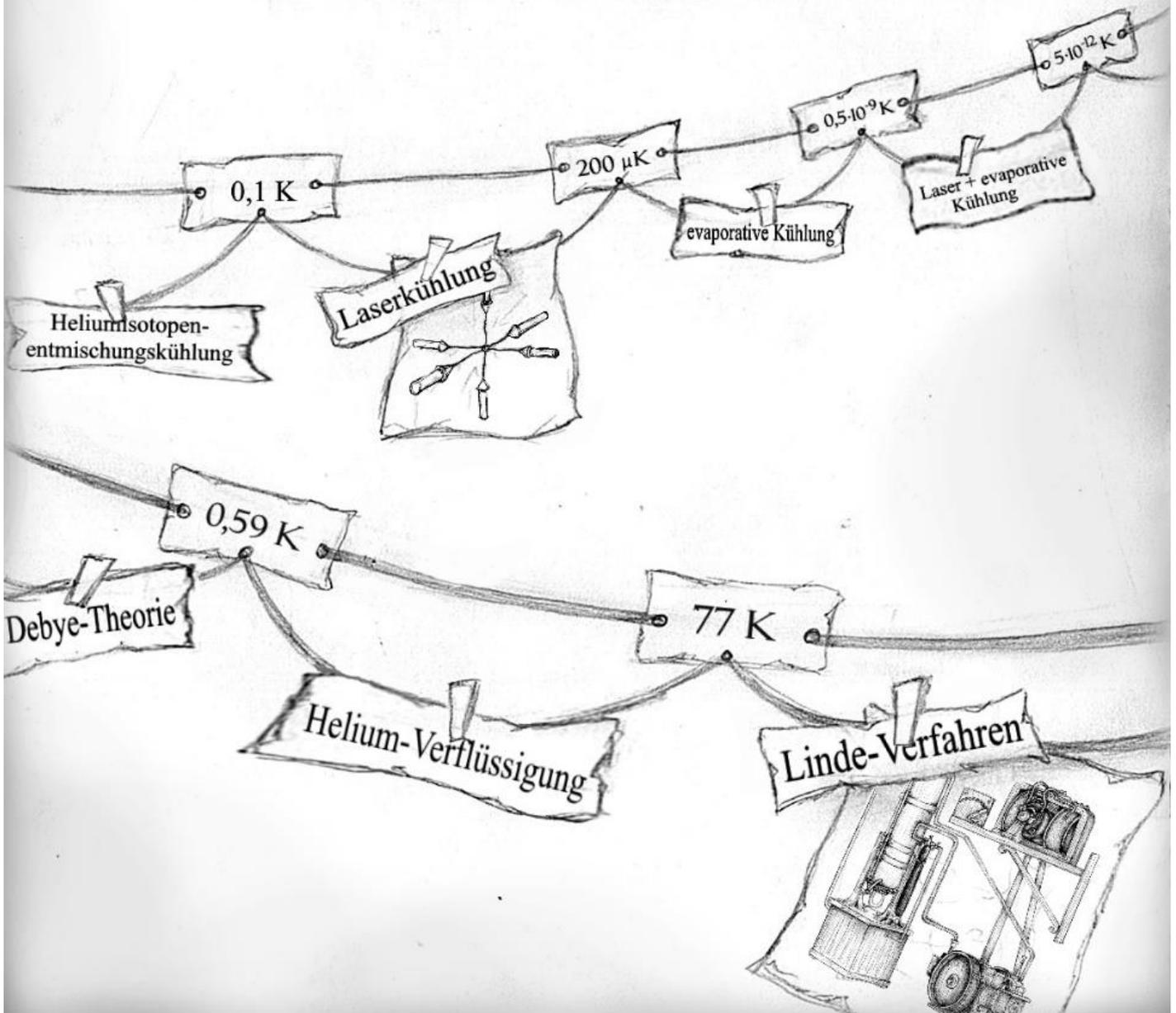


# REISE ZUM NULLPUNKT



# Die Reise zum Nullpunkt

Wiebke Beninga

1. Auflage 2021

Unter der Leitung von: Prof. Dr. Al-Shamery

Illustrationen: Lara Hüllenhagen

Wissenschaftliche Beratung: Prof. Dr. Holthaus

Alle Rechte vorbehalten

## Spielkonzept

Dieses Buch basiert auf einer Geschichte, die nur weitergehen kann, wenn ihr den Protagonisten dabei helft. Daher endet jedes Kapitel mit einem Rätsel oder einer Aufgabe, die ihr lösen müsst, um herauszufinden, wie es weitergeht. Jede Rätsellösung besteht aus einem 3-stelligen Zahlencode, den ihr mittels der Codematrix auf Seite 40 des Buches in eine Seitenzahl verwandeln könnt.

Um den Spaß an diesem Buch nicht zu verlieren, müsst ihr einige Regeln beachten:

1. Öffnet keine Seiten in diesem Buch, solange ihr nicht explizit dazu aufgefordert werdet oder ihr die Seite mittels der Codematrix herausfinden könntet.
2. Nehmt euch Stift, Papier und einen Taschenrechner zur Hand, um euch zusätzliche Notizen machen zu können.
3. Am unteren Rand jeder Rätselseite findet ihr kleine Holzkisten, in denen Tipps versteckt sind. Um diese zu „öffnen“, müsst ihr ganz ans Ende des Buches in das Kapitel Tipps springen (S. 41)

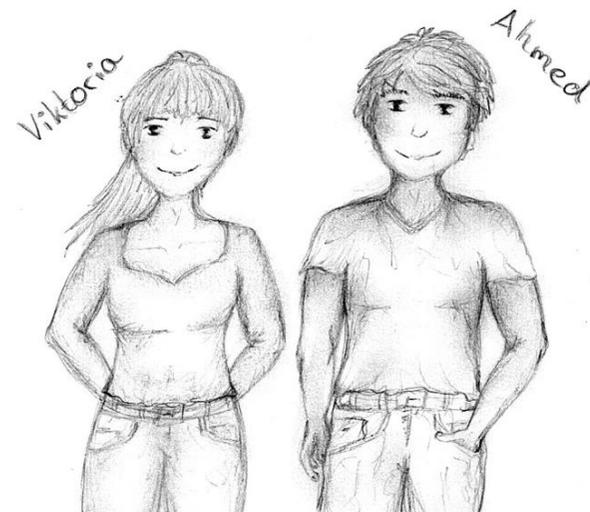
Natürlich könntet ihr ohne Weiteres schummeln, um schneller oder erfolgreicher fertig zu werden. Bedenkt dabei jedoch, dass ihr euch euren eigenen Spielspaß nehmt und es außerdem der Vorbereitung auf die Thermodynamikklausur dient.

**Viel Spaß und Erfolg!**

[Lest zunächst die Allgemeinen Hinweise auf Seite 39.](#)

## Die Reise beginnt...

Die Freunde Ahmed und Viktoria, zwei Studierende der Chemie im zweiten Semester, verbringen viel Zeit miteinander, sowohl in der Uni – so viele scheinen das Fach Chemie nämlich nicht zu mögen – als auch in ihrer wenigen Freizeit. Häufig erkunden sie dann die ihnen noch immer etwas fremde neue Stadt, denn beide kommen aus einer anderen Gegend und sind erst zum Studium nach Oldenburg gekommen. Auf ihren Streifzügen entdecken sie jedes Mal etwas Neues.



[Öffnet Seite 4 und lest bis Seite 6.](#)

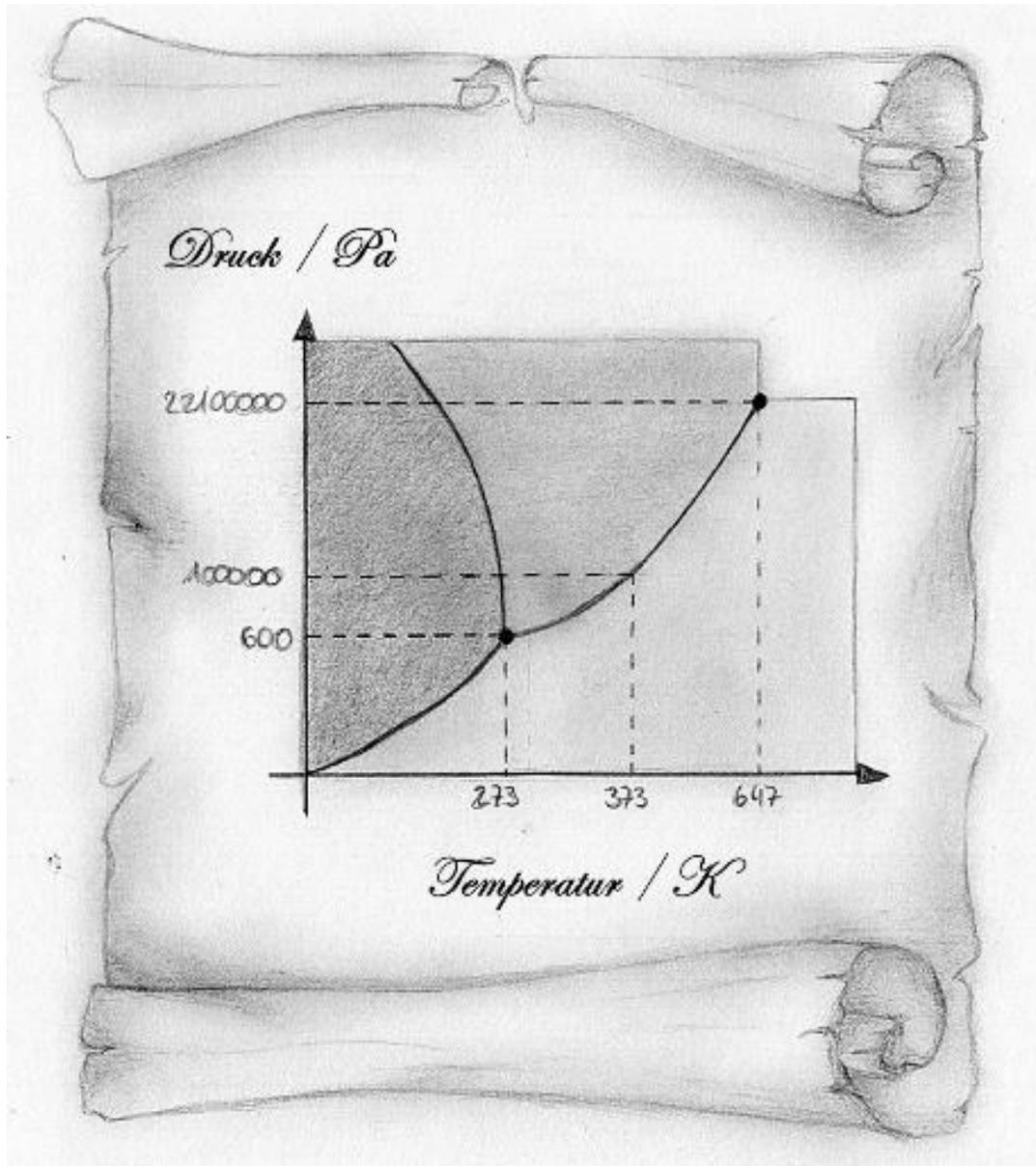
Eines Tages wandern sie durch den Schlossgarten und kommen in einen entlegenen Winkel, der ihnen völlig unbekannt ist. Er wirkte auch völlig anders als der Rest des Gartens, den sie kannten: Komplett verwahrlost und verwildert. Plötzlich entdecken sie einen sehr alten Springbrunnen. Bisher war er ihnen noch nie aufgefallen. „Sieh mal, Viktoria“, ruft Ahmed, „da gibt es Inschriften, die kaum noch zu lesen sind.“ „Lass mich mal sehen!“, meint Viktoria sofort, „Das ist bestimmt etwas Lateinisches. Das war doch früher so üblich: das Englisch des Mittelalters und der frühen Neuzeit sozusagen. Jedenfalls haben sich alle Gelehrten in Europa auf diese Weise verständigen können. Da steht, dass dies der Fortunabrunnen ist und da ist auch die Rede von Wundern und Wünschen und ... was

ist das? Irgendwelche merkwürdigen Zeichen!“ „Lass mal sehen“, meint Ahmed nur.

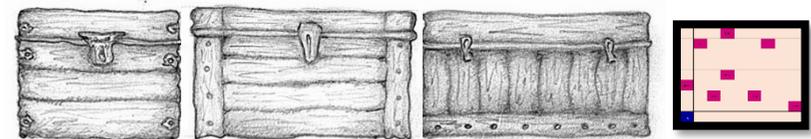


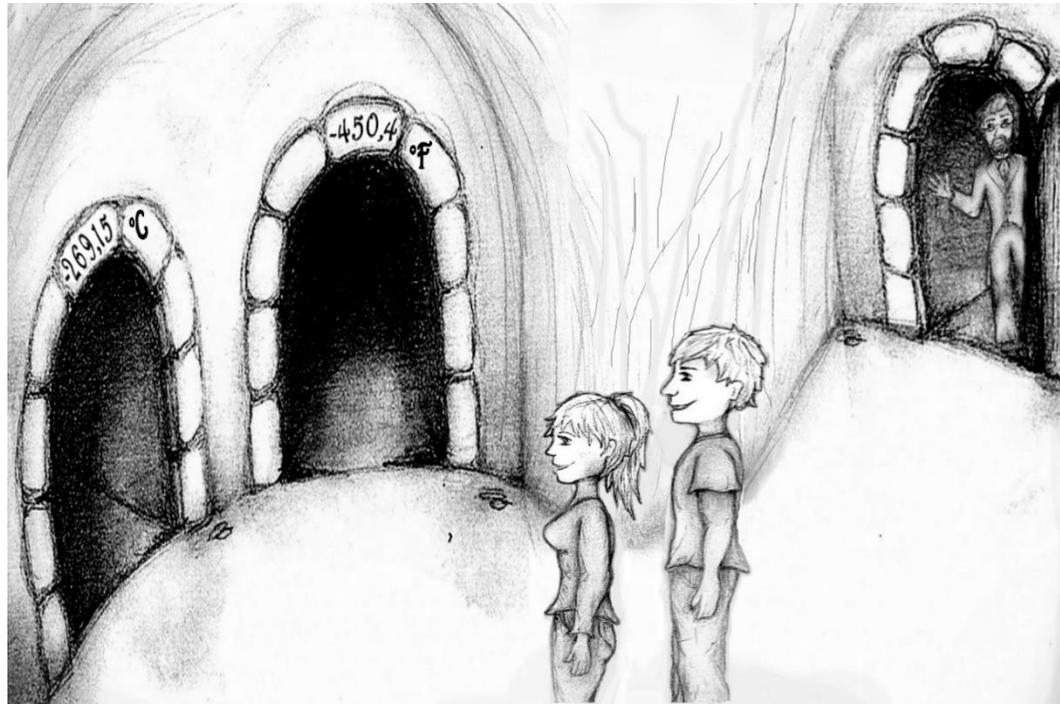


„Da ist ja ein lockerer Stein, den kann man rausziehen“, stellt er fest. „Pass auf, da hängt ja etwas dran!“, ruft Viktoria, als Ahmed den Stein aus dem Brunnen entfernt. „Das ist eine Pergamentrolle“, stellt er fest, und rollt sie auseinander. „Das sind ja komische Zeichnungen und eine merkwürdige Schrift“, Viktoria ist fasziniert, aber Ahmed hat sogleich eine Erklärung: „Schau mal, so komisch ist das gar nicht. Das kennen wir nur etwas moderner. Sieht aus wie ein Phasendiagramm. Und die Zeichen sind nur kunstvoll verschnörkelte Buchstaben. Allerdings muss ich zugeben, dass sie sich etwas merkwürdig ausdrücken: *Ein Molekül des Universums an diesem Ort und wo sich drei vereinen, da kannst du wieder fort.*“



„Was soll das denn bedeuten?“, rätselt Viktoria, aber schon bald haben beide die gleiche Idee: „Das Element muss Wasser sein, schließlich ist das hier ein Brunnen.“ „Ja, und wenn das hier wirklich ein Phasendiagramm ist, meinen sie mit der Vereinigung den Tripelpunkt. Aber wie wir nun wieder wegkommen? Und woher wegkommen überhaupt? Wir sind doch hier im Schlosspark“, Ahmed ist verwirrt, „Kennst du noch die Koordinaten des Tripelpunktes?“ „Schon, aber was sollen wir denn damit machen?“ fragt Viktoria. „Im Zweifelsfall würde ich immer erstmal addieren.“ entgegnet Ahmed.





„Ahmed, schau mal“, ruft Viktoria, „da ist eine Tür und dahinter genauso ein Gang, wie der, den wir vorhin gekommen sind. Wir haben es geschafft! Alle Rätsel gelöst!“ „Ja,“, meint Ahmed, „los, komm schnell, ehe sie sich wieder schließt!“ In ihrer Aufregung vergessen sie völlig, sich von Carl zu verabschieden, der ihnen noch ein paar aufmunternde Worte nachruft, die sie aber schon gar nicht mehr hören.

Sie müssen nicht lange durch den Gang laufen, da kommen sie an eine Verzweigung. Sollten sie rechts oder links weiter gehen?

Entscheidet selbst:

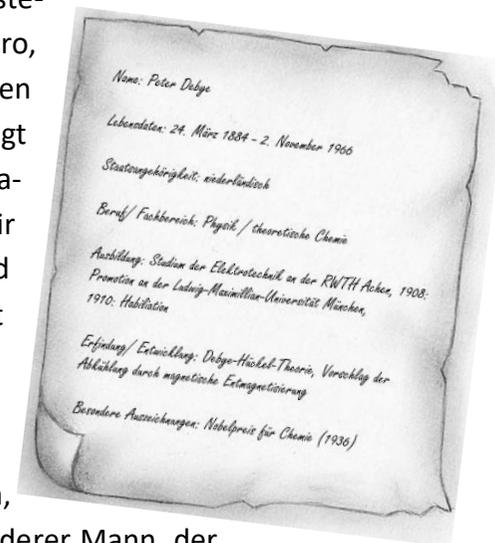
Die Reise soll rechts weitergehen: [Lies weiter auf Seite 23](#)

Victoria und Ahmed sollen den linken Weg nehmen: [Öffnet Seite 30](#)

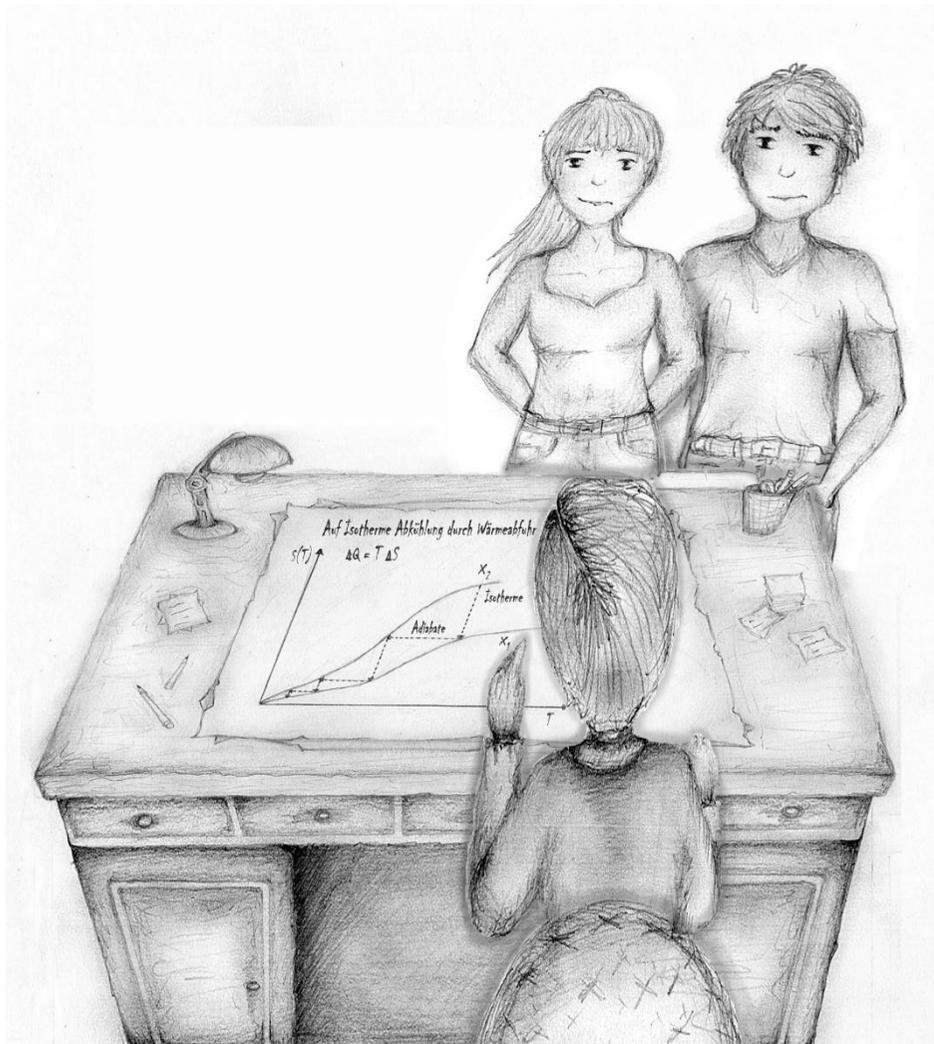
Sie laufen weiter und kommen an eine Tür. Ahmed warnt erneut: „Nur öffnen und reinschauen, es könnte schon wieder die falsche Zeit sein.“



Viktoria öffnet die Tür und bleibt stehen. Vor ihr befindet sich ein Büro, überall kleben Zettel an den Wänden, der Schreibtisch liegt voll. An der Wand hängt ein Kalender: 1926. „Hier sind wir richtig“, meint Viktoria und betritt den Raum. Überzeugt folgt ihr auch Ahmed. Am Schreibtisch sitzt völlig in seine Rechnungen vertieft ein Mann. Sie nähern sich ihm, aber da kommt schon ein anderer Mann, der über seinem Anzug einen weißen Kittel trägt, zu ihnen: „Entschuldigen Sie, hier dürfen Sie nicht rein. Der Herr Professor darf nicht gestört werden!“ In diesem Augenblick dreht sich der Professor zu ihnen um und meint nur: „Meyer, gehen Sie nur. Diese beiden machen während ihrer Zeitreise hier nur Zwischenstation. Sie brauchen mich, auch wenn ich noch gar nicht ganz fertig bin. Und es ist ja bisher auch nur eine reine Theorie. Es wird noch mindestens 10 Jahre dauern, bis jemand das in die Praxis umsetzen wird. - Gestatten, mein Name ist Peter Debye. Ich berechne gerade, wie weit man sich dem absoluten Nullpunkt nähern kann. Haben Sie mal davon gehört?“ Viktoria entgegnet: „Von dem Nullpunkt schon. Der liegt bei minus 273,15 °C. Was berechnen Sie denn?“



Bis Seite 10 dürft ihr lesen!

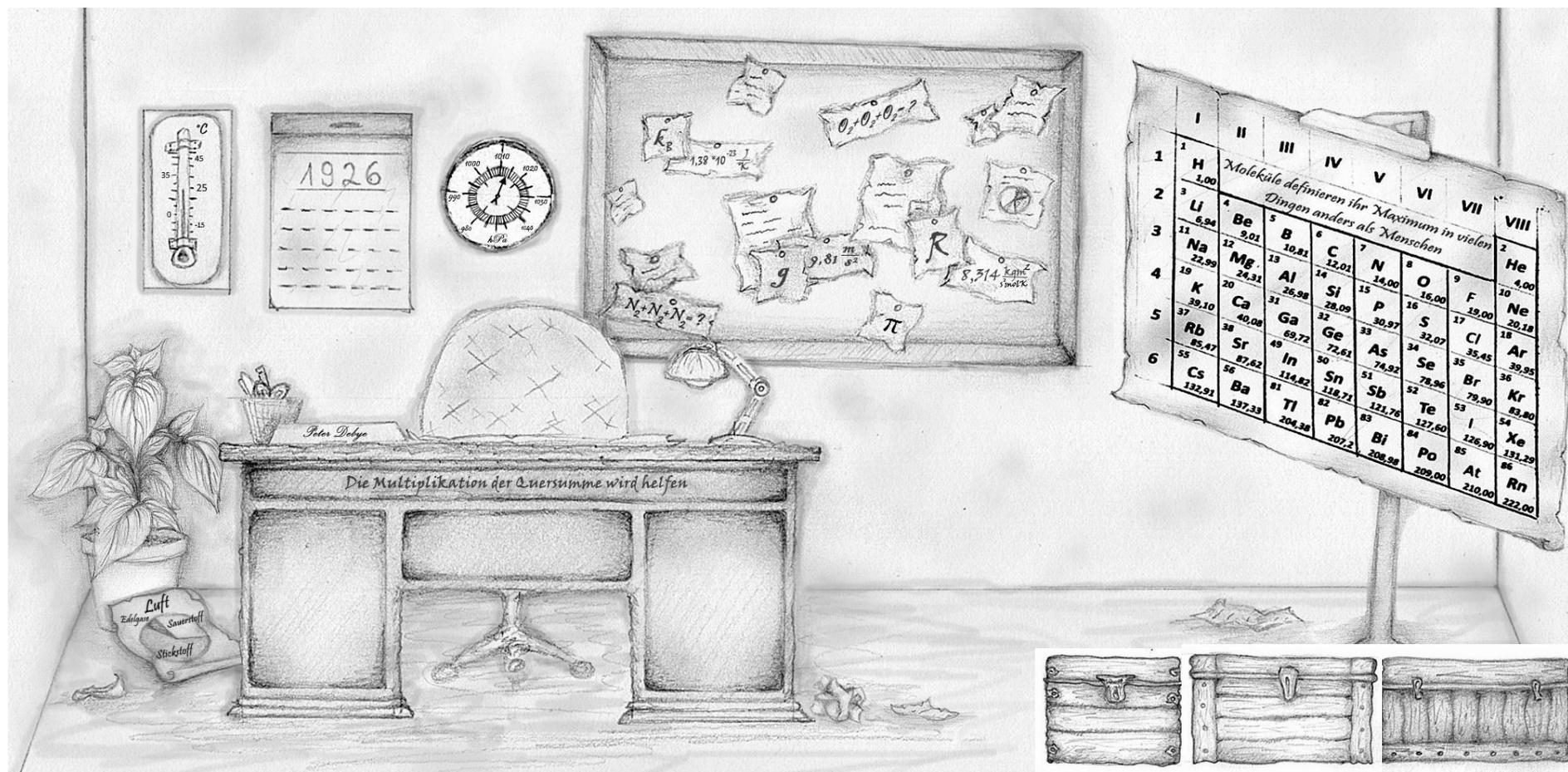
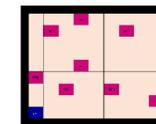


Debye fängt an zu erläutern: „Meine Überlegung ist, dass eine adiabatische Entmagnetisierung in paramagnetischen Salzen zu einer Temperatur im Milli-Kelvin-Bereich führen könnte.“ „Das verstehe ich

nicht“, gibt Viktoria ganz offen zu. „Also“, beginnt Debye, „adiabatisch bedeutet: ohne Wärmeaustausch. Bekannt ist wahrscheinlich auch, dass die Elektronen einen Spin haben und die thermodynamische Größe der Entropie temperaturabhängig ist.“ „Ja“, wirft Ahmed ein, „der 3. Hauptsatz der Thermodynamik.“ „Genau“, bestätigt Debye, „und die magnetische Kühlung basiert genau darauf, bezogen auf die magnetischen Momente des Materials, in diesem Fall der Elektronen in einem paramagnetischen Salz. Meine Überlegung ist jetzt, dass, wenn bei hohen Temperaturen die thermische Energie größer ist als die der Wechselwirkungen der völlig ungeordneten magnetischen Momente, dann gilt bei niedrigen Temperaturen also, dass die thermische Energie kleiner ist als die Energie der Wechselwirkungen der magnetischen Momente, die sich zu ordnen beginnen. Also wird die Entropie kleiner. Wenn man das Ganze nun in einem Magnetfeld stattfinden lässt, wird eine bestimmte Richtung bevorzugt, also alle Momente richten sich gleich aus. Das führt zu einer etwas höheren Ordnungstemperatur und die freigesetzte Wärme müsste abgeführt werden. Wenn man anschließend das Magnetfeld unter thermischer Isolierung, also adiabatisch senkt, so bedingt der Ordnungszustand eine tiefere Temperatur. Haben Sie das verstanden?“

„Joaaa, das klingt logisch“, vollzieht Viktoria die Gedanken des Professors nach und Ahmed nickt nur. „Laut meiner Berechnungen müssten sich dadurch Temperaturen von wenigen Millikelvin erzeugen lassen“, ist Debye überzeugt, „Aber nun zu Ihnen. Sie müssen sich mit Ihren

Aufgaben beeilen. Schauen Sie sich um und trauen Sie sich ruhig, mich zu fragen, wenn Sie Hilfe brauchen!“ Das lassen sich die beiden nicht zweimal sagen und machen sich an die Arbeit.





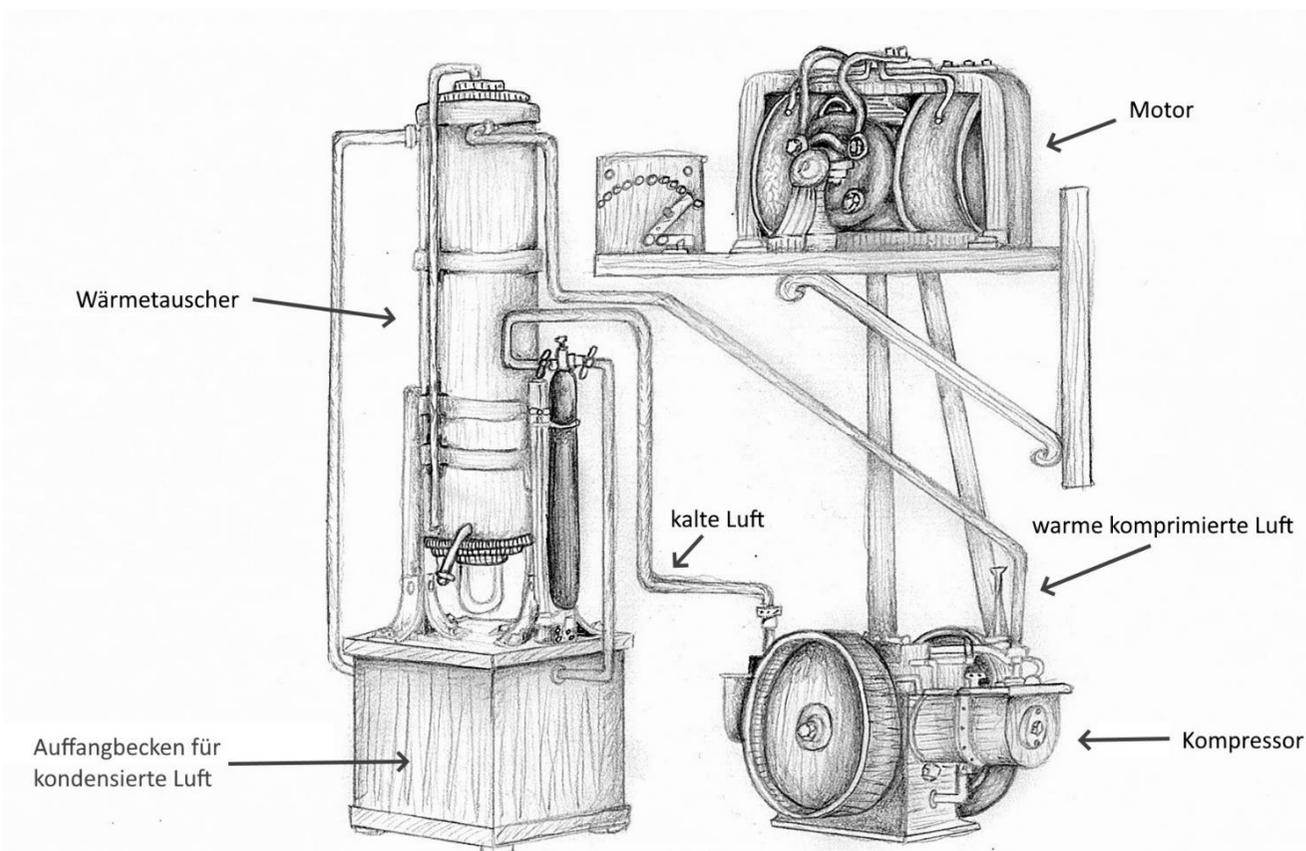
Name: Carl Paul Gottfried von Linde  
 Lebensdaten: 11. Juni 1822 - 16. November 1904  
 Staatsangehörigkeit: deutsch  
 Beruf / Fachbereich: Ingenieur  
 Ausbildung: abgeschlossene Studien an Polytechnikum Zürich, abgeschlossene  
 Ausbildung in Brauereifabrik  
 Entdeckung / Erfindung: Lindeverfahren zur Luftverflüssigung, Erfinder  
 und Gründer der Linde AG  
 Besondere Auszeichnungen: Verdienstorden der bayerischen Krone  
 -> Erhebung in den persönlichen Adelstand  
 -> Ritter von Linde

„Wow“, entfährt es Viktoria, die sofort erkennt, wer vor ihr steht. „Das ist ja Carl Linde, Ahmed, der ein Verfahren zur Luftverflüssigung entwickelt hat.“ Auch Ahmed ist jetzt im Bilde: „Ich weiß, beruhend auf der Basis des Joule-Thomson-Effekts und mit Hilfe des Gegenstromverfahrens! Ist ja cool!“ „Im wahrsten Sinne des Wortes! Guten Tag, die Herrschaften. Darf ich mich vorstellen? Carl Linde, wie Sie ja schon richtig erkannt haben. Und hier sehen sie den Prototyp zur Verflüssigung von Luft bzw. die Trennung der sich in der Luft befindlichen Gase.“ „Wow“, staunt Viktoria, „Das mal in der Realität zu sehen, ist echt cool. Ganz anders, als ich es mir vorgestellt habe und überhaupt nicht so schick wie die heutigen Anlagen, eher rustikal.“ „Naja“, entgegnet Carl, „da stecken ja auch eine Menge Überlegungen drin, die schrittweise umgesetzt wurden. Da muss man auch improvisieren und ihr in eurer Zeit habt bestimmt auch ganz anderes Material zur Verfügung.“

Bis Seite 13 dürft ihr weiterlesen.

„Ist das hier der Kompressor?“, fragt Ahmed. „Ja“, antwortet Carl, „Ihr scheint euch ja damit gut auszukennen, dann muss ich euch nichts mehr erzählen zu der Brownschen Molekularbewegung, dem idealen Gasgesetz und dem Joule-Thomson-Effekt.“

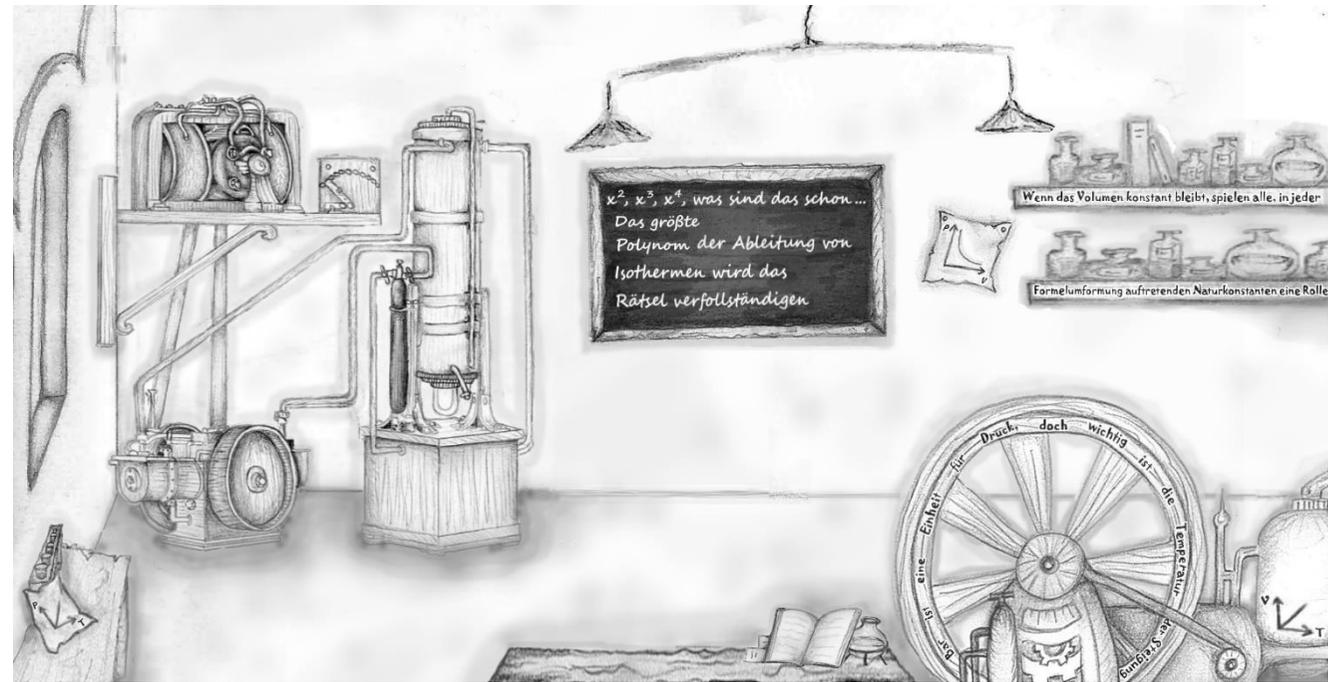
„Nee“, lacht Ahmed, „damit haben sie uns in der Thermo-Vorlesung genug „gequält“, darüber wissen wir jetzt Bescheid.“ Schmunzelnd meint Carl nur: „Dann will ich euch mal meine Apparatur erklären: Hier seht ihr also den Kompressor, der die Luft zusammenpresst. Über dieses Ventil wird sie dann in dieses Rohr abgelassen. Dabei dehnt sie sich aus und



kühlt ab. Diese kalte Luft wird jetzt in dem Wärmetauscher hier an der warmen Luft, die gerade vom Kompressor verdichtet wurde, vorbei geleitet und kühlt diese so nebenbei ab, bevor sie dann hier durch das Ventil abgelassen wird. Dadurch ist sie noch kälter. Da die Luft

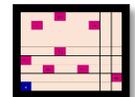
im Kreis fließt, kommt sie anschließend wieder in den Kompressor, wird erneut verdichtet und gleichzeitig durch vorbeiströmende Luft abgekühlt und so weiter. Da die Luft jedes Mal, wenn sie erneut nach der Kompression verdampft, kälter ist als vorher, wird sie irgendwann so kalt, dass sie kondensiert und aufgefangen werden kann.“

„Schade, dass Sie nicht einen kurzen Moment in unsere Zeit blicken können, um zu sehen, was alles Tolles aus diesem Gedanken entstanden ist und wie jeder einzelne davon profitiert hat, nicht nur Unternehmen“, äußert Viktoria nachdenklich. Carl lacht warm und herzlich: „Das kann ich mir schon denken. Interessant wäre es schon, aber ihr müsst langsam in eure Zeit zurück. Dazu müsst ihr den nächsten Schritt gehen. Erst, wenn ihr den absoluten Nullpunkt erreicht habt, werdet ihr wieder zu Hause



sein. Wie ihr seht, ist die Tür, durch die ihr diesen Raum betreten habt, nicht mehr vorhanden.“ Ahmed und Viktoria sehen sich um. Es stimmt. Wo vorher die Tür war, gibt es nur noch eine Wand. Natürlich hat die Halle noch Tore, durch die sie hätten gehen können, aber dort draußen gibt es offensichtlich nur das Leben um 1895. Wie sollten sie nur wieder zurückkommen? Carl weiß Rat: „Die nächste Zeitspalte wird sich öffnen, wenn ihr die Aufgaben lösen könnt, die sich in diesem Raum befinden. Schaut euch mal in meiner Werkstatt um!“ Das lassen

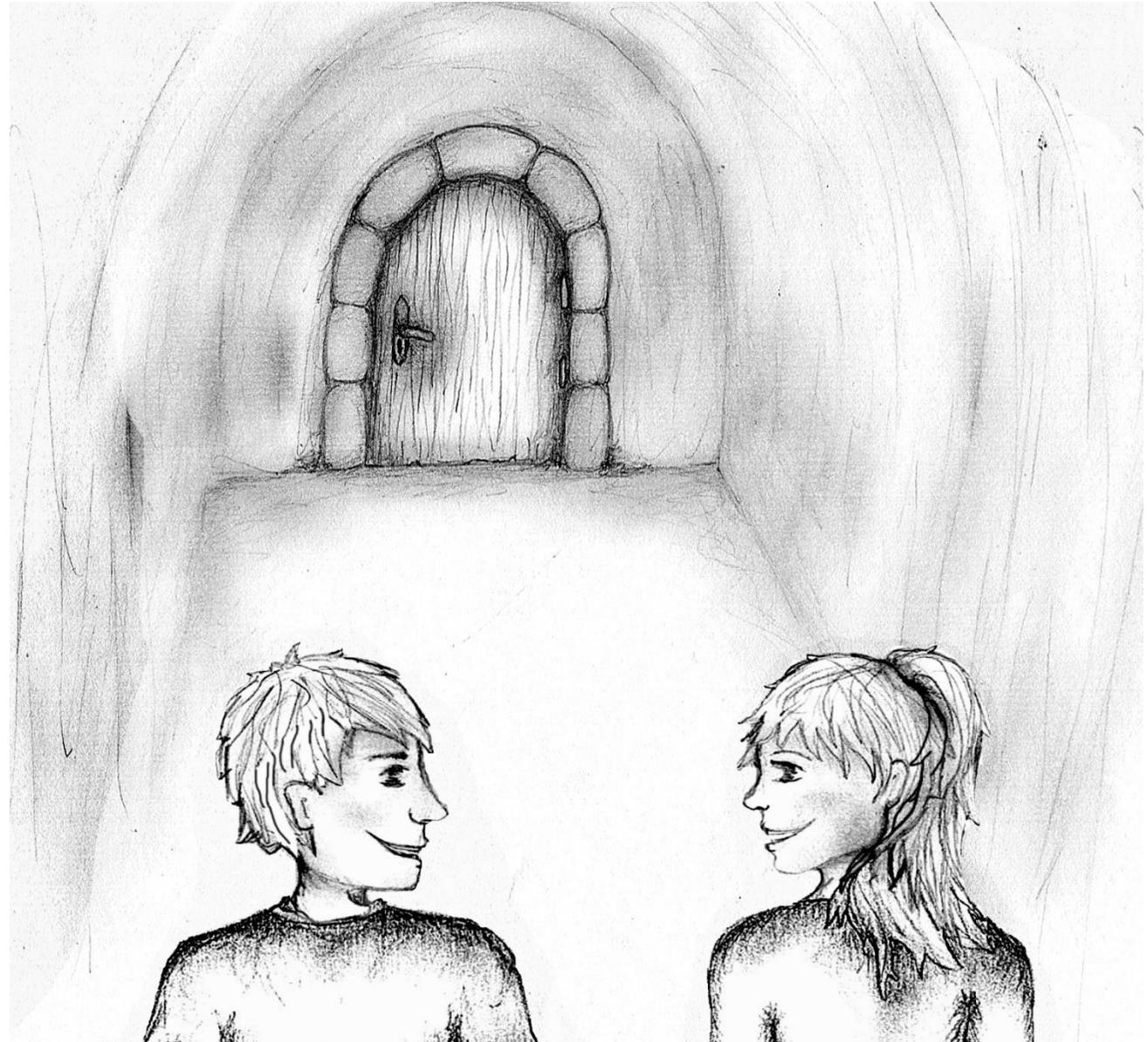
sich die beiden in der Zeit Gestrandeten nicht zweimal sagen. Sofort beginnen sie zu überlegen. „Linde konnte doch als tiefste Temperatur 77 Kelvin erzeugen“, meint Ahmet auch sofort, „da sind wir noch ein schönes Stück vom absoluten Nullpunkt entfernt. Aber besser als nichts! Lass uns mal die Rätsel suchen!“ Viktoria sieht sich um: „Puh, das wird nicht leicht werden. Jetzt wird sich zeigen, wie gut wir in der Vorlesung aufgepasst und wieviel wir wirklich verstanden haben. Ach, egal, wir schaffen das schon zusammen!“



„Wir haben es geschafft!“, ruft Ahmed. „Ja, da vorne öffnet sich die Tür,“ bestätigt Viktoria.

Und wieder laufen sie einen hellen grauen Gang hinunter, bis sie zu einer Tür kommen. „Warte!“, meint Ahmed nur, „Wir haben aber diesmal keine Abzweigung übersehen, oder?“ „Nein“, erwidert Viktoria lachend, „diesmal sind wir richtig.“ Sie öffnen die Tür und sehen sich um.

Bis Seite 18 ist euer Weg frei.





Sie entdecken einen Mann an einem Schreibtisch. Eine weitere Tür an der linken Seite führt anscheinend in ein Labor. Sie steht offen und man hört Stimmen aus dem erhellten Raum, die darauf hindeuten, dass dort experimentiert wird. Er wirkt introvertiert als würde er am liebsten allein sein. „Hörst du das?“, flüstert Viktoria, „die im Nebenraum sprechen doch Englisch, oder?“ Ahmed nickt nur, versucht die neue Situation einzuordnen. „Mist, in Englisch war ich in der Schule

eine totale Niete, hat mein Abi runtergezogen. Hoffentlich müssen wir jetzt nicht auch noch alles auf Englisch machen“, äußert sich Viktoria leicht verstört. „Nein, das müssen Sie nicht!“, dreht sich der Mann am Schreibtisch zu ihnen um, erhebt sich und kommt ihnen entgegen. Ein leichtes Lächeln tritt in sein Gesicht: „Kommen Sie nur näher. Mein Name ist London, Heinz London, und wir befinden uns hier in Oxford im Jahr 1961, aber ich stamme aus Deutschland. Ich garantiere Ihnen jedoch, dass Sie sich im Laufe Ihres Studiums und Ihrer Laufbahn, schon aus eigenem Interesse, mit dieser Sprache werden auseinandersetzen müssen, aber nicht heute.“ Viktoria merkt man die Erleichterung an: „Dann ist es ja gut. - Entschuldigen Sie, aber von Ihnen habe ich noch nie etwas gehört oder gelesen. Ist das schlimm?“ Heinz London beginnt zu lachen: „Ist es nicht immer schlimm, wenn Menschen nach ihrem Tod vergessen werden? Nur wenn keiner mehr ihren Namen nennt, sind sie doch wirklich tot, haben nie existiert!

Aber nun werden wir philosophisch ...“ „Das liegt wahrscheinlich an uns“, mischt sich Ahmed ein, „wir sind ja noch nicht so lange am Studieren. Das kommt vielleicht alles noch. Immerhin sind wir hier gelandet auf unserer Zeitreise zurück, das heißt doch, dass Sie etwas gemacht haben müssen, was uns hierhergeführt hat.“ Immer noch lachend wendet sich Heinz London zu Viktoria um: „Kluger Kopf, der junge Mann an Ihrer Seite!“ Und dann erzählt er weiter:



„Ich arbeite gerade an einer Entmischungs-kühlung von Helium-isotopen. Sagt Ihnen das etwas?“ Beide schütteln den Kopf. „Helium sagt mir schon etwas, ein Edelgas, und was Isotope sind, weiß ich auch“, lässt sich Viktoria etwas schüchtern vernehmen. „Na, das ist

doch schon einmal ein Anfang!“, macht Heinz London ihnen Mut. „Habt ihr auch schon mal etwas von Phasendiagrammen gehört?“, schiebt er, in das vertraulichere *du* wechselnd, nach. Als beide zustimmend nicken, fährt er fort: „Wenn man eine Heliummischung der Isotope  $^3\text{He}$  und  $^4\text{He}$  hat, dann bilden sich bei einer Temperatur von weniger als einem Kelvin zwei flüssige Phasen, nämlich eine, die fast nur aus  $^3\text{He}$  besteht und eine weitere, die außer  $^4\text{He}$  noch ca. 6%  $^3\text{He}$  enthält. Aufgrund ihrer geringeren Dichte schichtet sich die  $^3\text{He}$ -



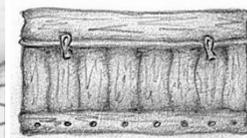
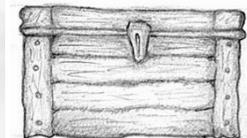
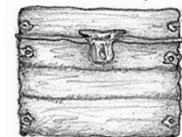
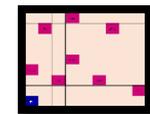
Phase über die  $^4\text{He}$ -Phase. Bei dieser Temperatur wird die verdünnte  $^4\text{He}$ -Phase eine Quantenflüssigkeit mit suprafluiden Eigenschaften. Das heißt, dass es innerhalb dieser Flüssigkeit keinen Reibungswiderstand mehr gibt. Wir sprechen dann von einer idealen Flüssigkeit. Die  $^3\text{He}$ -Atome in der unteren Phase bewegen sich also ähnlich wie Atome im Vakuum. Wenn jetzt ein  $^3\text{He}$ -Atom aus der konzentrierten Phase in die verdünnte Phase übergeht, also die Phasengrenze überschreitet, dann braucht es dafür Energie, die es der Umgebung entzieht, die sogenannte Mischungsenthalpie.“



„Das kennt ihr wahrscheinlich schon von der Verdampfungskühlung, wo ja die Phasengrenze von flüssig zu gasförmig überschritten wird. Wenn der Umgebung Wärme entzogen wird, kühlt sie ab. Das ist die Theorie dahinter. Wenn man das jetzt in die Praxis umsetzen will, muss man bedenken, dass die Kühlleistung des Systems davon abhängt, wieviel  $^3\text{He}$ -Atome in einer bestimmten Zeit die Phasengrenzfläche überschreiten. Interessant ist, dass dieser Kühlungsprozess bis zu beliebig niedrigen Temperaturen funktioniert, weil nämlich die verdünnte  $^4\text{He}$ -Phase aus thermodynamischen Gründen immer auch einen verschwindend geringen Anteil an  $^3\text{He}$  enthält. Sogar am absoluten Nullpunkt, also bei Null Kelvin, gibt es keine vollständige Entmischung, sondern immer noch ein Gleichgewicht, von ca. 6% gelöstem  $^3\text{He}$  in der gelösten  $^4\text{He}$ -Phase. In einer Apparatur muss man nun den Konzentrationsunterschied des  $^3\text{He}$  in den beiden Phasen durch stetes Entfernen des  $^3\text{He}$  aus der verdünnten Phase erhalten. Damit man wieder zu einem  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ -Mischungsgleichgewicht kommt, treten kontinuierlich aus der konzentrierten  $^3\text{He}$ -Phase Atome in die verdünnte Phase ein. Mit den technischen Details der Umsetzung will ich euch nicht langweilen. Wichtig ist doch nur, dass ihr das Prinzip verstanden habt, oder?“

„Ja, das haben wir. Vielen Dank dafür. Hört sich auch total interessant und spannend an. Sie werden bestimmt nicht vergessen werden“, lacht Viktoria Heinz London an. „Das will ich doch hoffen und nun an eure Aufgaben. Habt ihr sie schon entdeckt? Ich wünsche euch viel

Erfolg dabei und helfe natürlich gerne, aber ich bin sicher, dass ihr meine Hilfe gar nicht braucht“, meint Heinz London noch abschließend, drehte sich um und ging zurück an seinen Schreibtisch. „Na, denn lass uns mal anfangen!“, Ahmed atmet tief durch.



Viktoria wundert sich: „Wo sind wir hier? Kommt es dir nicht auch komisch vor? Die Geräusche der Autos sind doch sonst immer noch ganz leise zu hören, aber jetzt ist alles still, nur die Vögel zwitschern laut.“

„Ihr seid in dem viel gerühmten Wunderburggarten des Grafen Anton Günther. Einst ein wunderschöner Ort, aber nach des Grafen Tod wurde er an die Familie des Bürgermeisters Giebel verkauft. Die haben ihn bedauernswerter Weise verkommen lassen. Dies hier sind die traurigen Reste“, erklärte eine Stimme hinter ihnen. Niemand hatte diesen Unbekannten kommen hören. Erschrocken drehen sich Viktoria

und Ahmed um. Vor ihnen steht ein Mann in ungewöhnlichen Kleidern. Sie passen besser ins 19. als ins 21. Jahrhundert. Ahmed und Viktoria sind verwirrt und verängstigt. Der Unbekannte aber wirkt nicht bedrohlich, sondern nur freundlich und nett. Hilfsbereit erklärt er



ihnen, dass sich immer mal wieder ein Zeitspalt im Schlossgarten öffnen würde, durch den sich Menschen, ohne es zu bemerken, bewegten. Leider sei der Spalt nun verschlossen, wodurch sie nicht mehr zu-

rück könnten. Deshalb sei er nun hier, um den Verirrten einen anderen Ausweg zu zeigen. Sie müssten sich dazu ohne Angst in diesen Brunnen stürzen. Der sei tiefer als sie denken, aber er führe letztlich zu einem Gang. Den müssten sie entlang wandern. Sie würden schon bemerken, wenn er zu Ende sei. Das war das Einzige, was er noch auf ihre Nachfragen bereit war, an Informationen zu geben. Und das es noch ein langer rätselhafter Weg sein würde. Dann verschwand der Unbekannte ins Nichts, aus dem er gekommen war.

[Lest nun auf Seite 20 weiter](#)



Todesmutig meint Viktoria nur: „Na, denn mal los, Ahmed, anders scheint es ja nicht zu gehen, und heute Abend müssen wir noch das Thermo-Protokoll fertig machen!“ Mit diesen Worten stürzt sie sich kopfüber in den Brunnen und hört Ahmeds Einwände nicht mehr. Der Zurückgebliebene bückt sich tief über den Brunnenrand und ruft: „Viktoria, wo bist du? Geht es dir gut?“ Aber alles, was er hört, war das Echo seiner eigenen Worte. Traurig und unschlüssig bleibt er einen Moment vor dem Brunnen stehen, dann stürzte er sich ebenfalls hinein. Einen anderen Ausweg gibt es ja nicht.

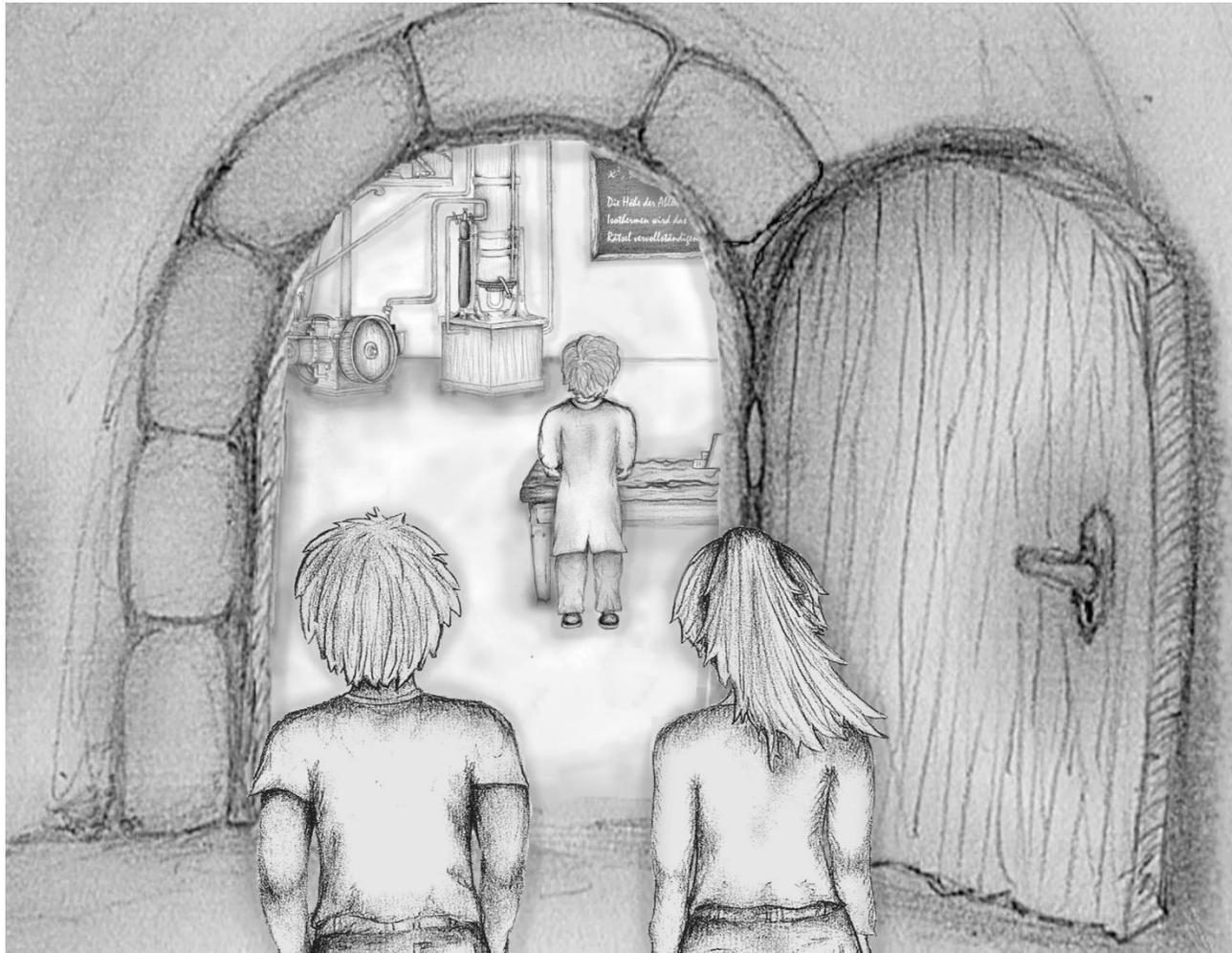
Es ist gar nicht so schlimm, wie er gedacht hatte. Zwar scheint der Fall unendlich zu sein und es ist eng, düster und riecht muffig, aber ehe er sich all dessen bewusst wird, landet er sanft in einem hellen, fensterlosen Gang.

[Führt auf Seite 21 fort.](#)

Dort wartet Viktoria bereits auf ihn. Es ist merkwürdig: der Ort ist hell, aber es gibt keine Lampen oder ähnliches. Die Wände sind in einem

hellen Grau, aber ohne jegliche Struktur und aus einem ihnen völlig unbekanntem Material. Irritiert sieht sich Ahmed um. „Los jetzt“, meint Viktoria nur, „trödel nicht so rum! Schnell scheint der Weg nach Hause schließlich nicht zu sein.“ Dann läuft sie los und Ahmet ihr hinterher.

Am Ende des Ganges gelangen sie an eine Tür. Als sie diese öffnen, stehen sie in einer großen Halle. Der Boden besteht aus festgestampftem Lehm, es ist sehr laut durch den Maschinenlärm. Alles wirkt staubig und alt. Mittendrin steht ein schlanker Mann mittleren Alters.

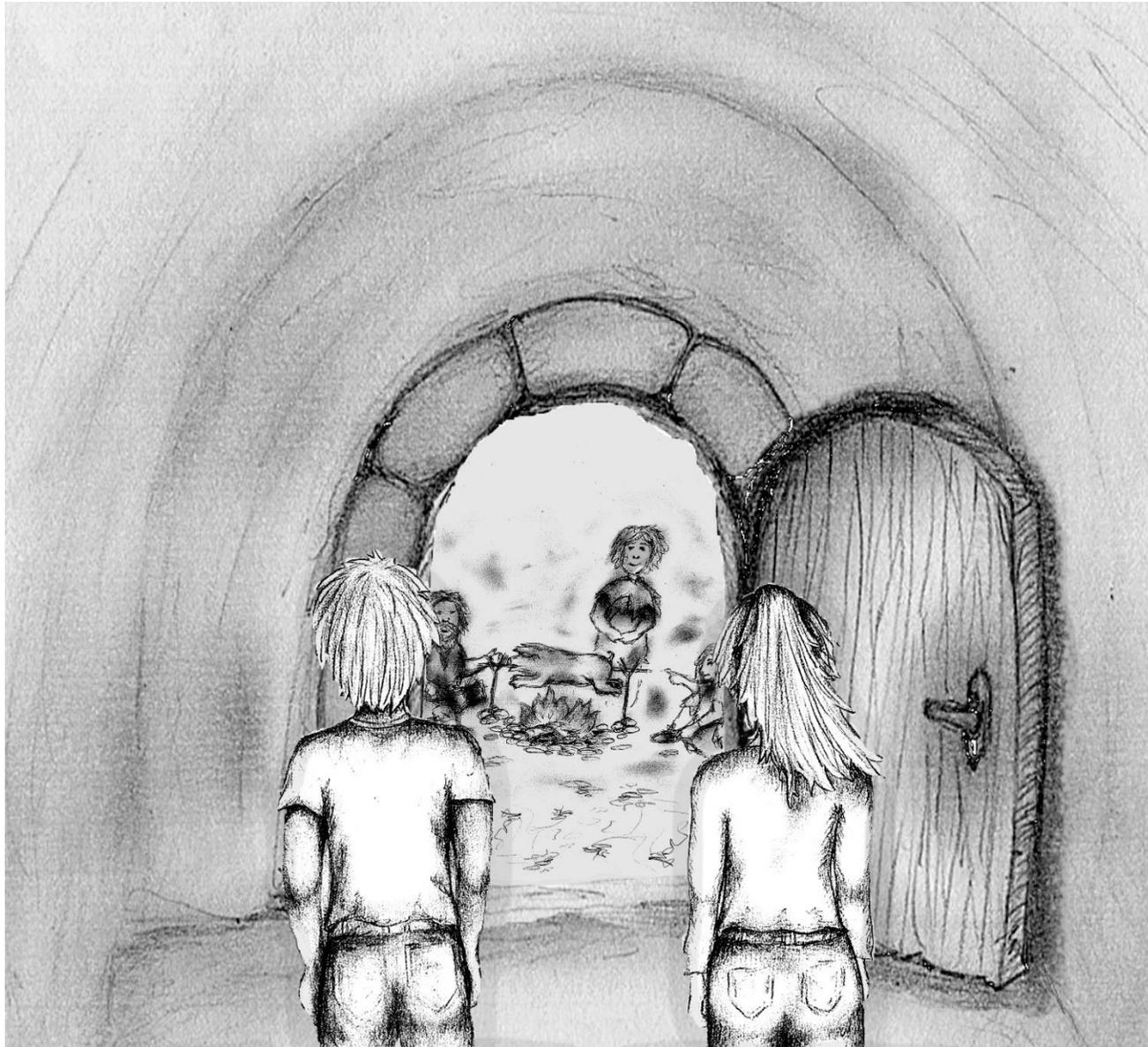


[Fahrt auf Seite 11 fort.](#)

„Mir wird schon wieder so komisch“, stellt Viktoria fest, als sie fertig sind. Ahmed meint nur: „So, geschafft, wie geht es jetzt weiter?“ „Keine Ahnung“, entgegnet Viktoria, „mir wird richtig schlecht. Die ganze Umgebung scheint sich zu verändern.“ Wie aus der Ferne vernahmen sie noch Wolfgangs Stimme, der ihnen eine gute Heimkehr wünschte. „Du hast Recht“, stellt Ahmed fest, „schau mal, wir sind wieder im Schlossgarten! Wir haben es geschafft! Wir sind zu Hause!“ Viktorias Freude hingegen hält sich in Grenzen, dafür geht es ihr nicht gut genug, obwohl sie mindestens genauso froh darüber ist. Sie stehen vor dem Oldenburger Schloss. Auf der Straße fahren Autos und alles ist so wie immer. Keine andere Zeit, keine anderen Orte. Langsam geht es Viktoria besser und auch sie begreift, dass das ganze Abenteuer endlich vorbei ist. Beide fühlen sich völlig erschöpft, aber Ahmed stellt fest: „Wir müssen jetzt nach Hause und das Thermo-Protokoll fertig machen. Obwohl ich ja finde, dass wir für heute genug PC hatten.“ „Das stimmt wohl“, lacht Viktoria, „aber ich fürchte, dass uns das keiner glauben wird, wenn wir unser Abenteuer erzählen.“ Sie sieht auf ihr Handy. Es funktioniert wieder, einige neue Nachrichten hatte sie auch bekommen, aber das interessiert sie gerade nicht: „Weißt du, dass mal gerade eine Stunde vergangen ist?“ „Echt jetzt?“, fragt



Ahmed ungläubig, „gefühlte waren das Tage! Bist du ganz sicher? Dann haben wir den Abgabetermin wohl nicht verpasst und müssen wirklich noch was tun.“ Lachend gehen sie zu ihren Fahrrädern, schlossen sie auf und fuhren nach Hause.

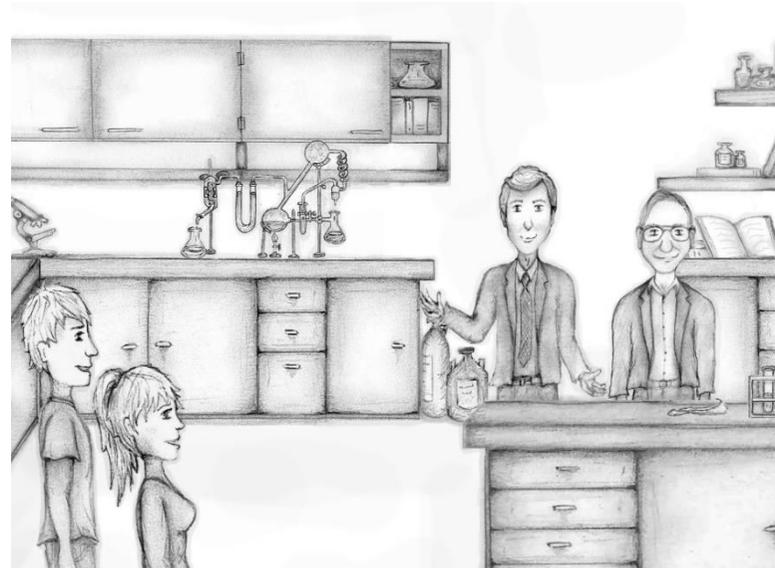


Am Ende des Ganges stoßen sie auf eine Tür. Als sie diese öffnen, sehen sie ein Lagerfeuer vor sich. Drum herum sitzen Menschen in Felle gekleidet. „Halt!“, ruft Ahmet der an ihm vorbeischießenden Viktoria zu, „Hier sind wir völlig falsch, das wäre ja ein Schritt in der Zeit zurück. Wir haben die falsche Abzweigung genommen. Lass uns schnell zurück gehen und den linken Gang nehmen!“

Also laufen sie zurück und nehmen diesmal die richtige Abzweigung.

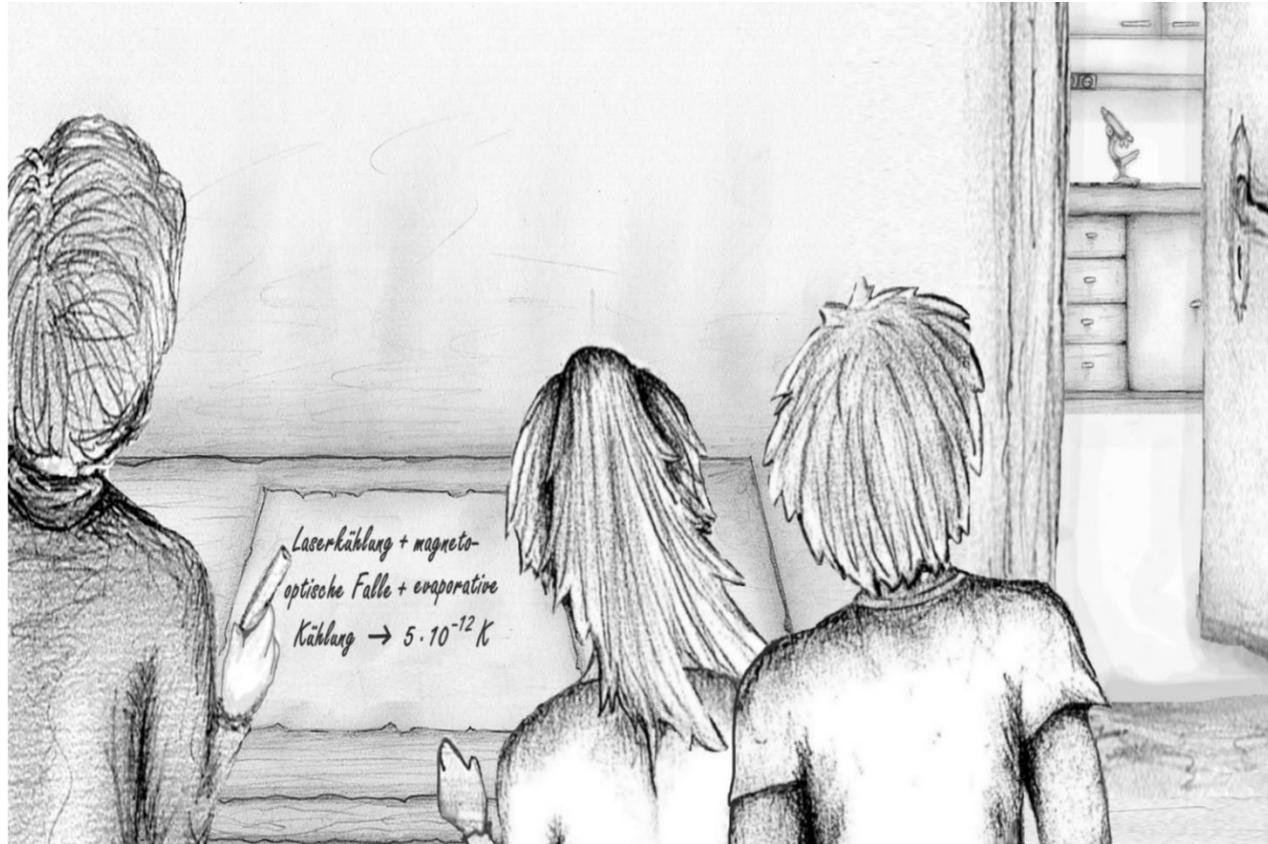
[Kehrt zu Seite 7 zurück.](#)

Viktoria schaut zu Ahmed:  
„Das ist ja komisch, schau mal! William Phillips wird ganz durchsichtig, obwohl ich noch immer seine Hand halte.“ „Dann haben wir wohl alles richtig gemacht! Der Raum verändert sich auch. Dort in der Ecke stehen Pritchard und Ketterle, siehst du sie auch?“, fragte Ahmed. „Ja, ich lass jetzt mal Williams Hand los. Mal sehen, was passiert“, traute sich Viktoria. Aber beide stellen fest, dass sich das diffuse Gefühl und der Schwindel nicht mehr einstellen, sondern der Raum klar bleibt und beide Wissenschaftler gut zu erkennen sind. Allerdings wirkt Ketterle wesentlich jünger als vorher. Die beiden Studierenden waren irritiert, aber Wolfgang Ketterle klärt



sie auf: „Ich habe einige Jahre mit Pritchard zusammengearbeitet und anschließend, nach seinem Rückzug aus dem Thema, alleine weiter daran gearbeitet. Deshalb ist dies auch die letzte Station auf eurem Weg nach Hause. Wenn ihr hier durch seid, kommt ihr in eure Zeit zurück. Aber zunächst werde ich euch noch den bisher letzten Schritt erläutern, den die Wissenschaft zurückgelegt hat, um den absoluten Nullpunkt zu erreichen.“ „Sie sind also auch noch nicht ganz angekommen?“, fragte Ahmed interessiert nach. „Nein“, lachte Ketterle

Weiterlesen ist bis Seite 28 erlaubt!



„Mein Freund und Mentor David Pritchard und ich haben in den 80ern des letzten Jahrhunderts Erfolge mit der evaporativen Kühlung gehabt. Von William habt ihr ja eben schon gehört, wie die magneto-optische Falle funktioniert. Wenn man berücksichtigt, dass sich darin die Atome unterschiedlich schnell bewegen und man die schnelleren

Atome, die sich an der Oberfläche befinden, gezielt entfernt, verlangsamt man das System und kühlt es damit auch ab. Je öfter man dieses Prinzip wiederholt, desto niedrigere Temperaturen kann man also erzeugen. Damit kommt man schon auf ungefähr  $0,5 \cdot 10^{-9}$  Kelvin, also schon ganz schön kalt.“ „Oh ja“, warf Viktoria ein. „Nachdem David sich aus diesem Forschungsbereich zurückgezogen hatte, konnte ich seine Forschung dennoch fortsetzen. Ich habe dann versucht, die Kühlungsmethoden zu kombinieren, also zunächst mit der Laserkühlung in der magneto-optischen Falle quasi vorgekühlt und dann noch die evaporative Kühlung, also das Abfangen der quasi wärmeren,

also energiereicheren Atome. Ich konnte damit auf  $5 \cdot 10^{-12}$  Kelvin kommen. Damit ist es mir Mitte der 90er gelungen, ein Bose-Einstein-Kondensat zu erzeugen. Wisst ihr, was das ist?“ Viktoria und Ahmed schütteln die Köpfe: „Damit können wir nichts anfangen.“

Wolfgang erklärt weiter: „Das dauert jetzt aber etwas länger. Wollt ihr einen Tee trinken?“ Bevor Ahmed etwas sagen kann, nimmt Viktoria das Angebot sofort an: „Gerne, ich bin am Verdursten.“ Als der Tee fertig ist, erklärt Ketterle weiter: „Es handelt sich beim Bose-Einstein-Kondensat um eine Art 5. Aggregatzustand, der aber nur unter extremen Bedingungen entstehen kann. Ihr wisst doch sicherlich, dass alle bewegten Teilchen, also Atome und Moleküle dem Welle-Teilchen-Dualismus unterliegen? Sie haben also sowohl Eigenschaften einer Welle als auch eines Teilchens. Bei normalen Temperaturen, in denen wir leben, treten sie als Teilchen auf, weil ihre Energie und ihr Impuls groß genug sind. Habt ihr mal etwas von de Broglie gehört? Danach wird die Wellenlänge immer größer, je niedriger die Temperatur wird, Impuls und Energie hingegen werden immer kleiner. Dadurch kommen die Welleneigenschaften immer mehr zum Vorschein, bis die Wellenlänge gleich groß ist mit dem mittleren Teilchenabstand. Und genau in dem Augenblick

fangen die Wellenpakete an sich zu überlappen. Je niedriger die Temperatur dabei ist, desto mehr verlieren die Teilchen ihre Eigenständigkeit.





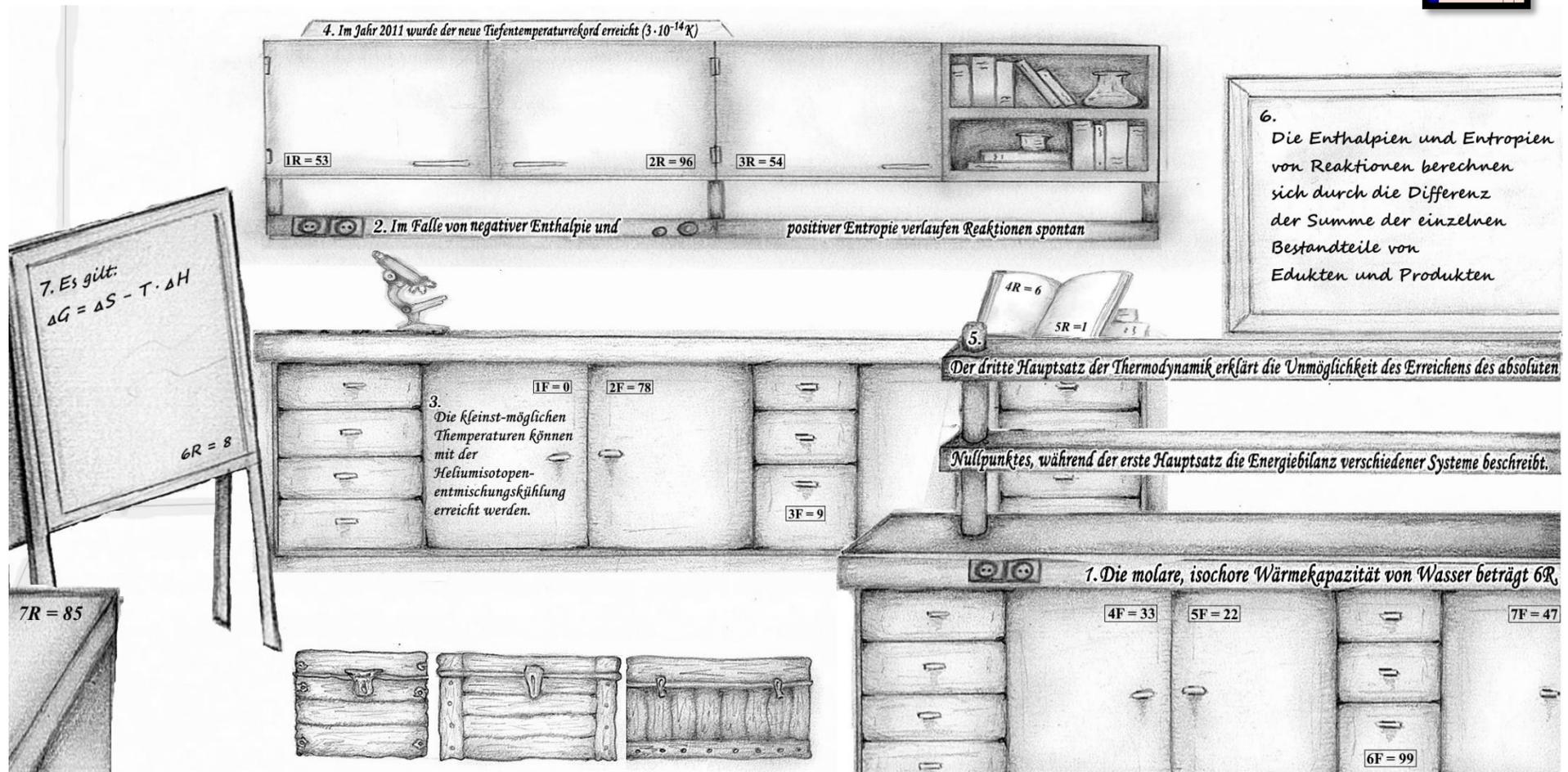
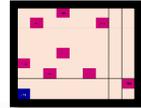
Am absoluten Nullpunkt ist diese komplett verschwunden und die Teilchen bewegen sich als ein zusammenhängendes System. Dabei handelt es sich um einen Quantenzustand, in dem alle Teilchen die gleiche Phase und gleiche Quantenzahlen haben.

Um es nochmal anders zu erklären: Wenn bei tiefen Temperaturen die de Broglie-Wellenlängen der einzelnen Atome so groß werden, dass sozusagen alle einzelnen Mini-Wellen überlappen und eine einzige "makroskopische" Materiewelle ausgebildet wird, dann entsteht ein neuer, "kohärenter" Zustand der Materie, der sich im Vergleich zu normaler Materie ungefähr so verhält wie Laserlicht im Vergleich zu normalem Lampenlicht.“

„Und wozu braucht man sowas?“, zeigt sich Viktoria interessiert. „Das ist deshalb so interessant, weil Substanzen in diesem Zustand Eigenschaften wie Suprafluidität, Supraleitung oder Suprasolidität aufweisen. Faszinierend ist dies auch deshalb, weil ein Körper in diesem Zustand gleichzeitig sowohl feste als auch suprafluide Eigenschaften zeigt. Aber das ist im Augenblick vor allem Grundlagenforschung. Bis das für die Allgemeinheit anwendungsbezogen genutzt werden kann, dauert es noch viele Jahre.“

„Naja, vielleicht haben wir sogar noch etwas davon, wer weiß? Ich finde es faszinierend“, kommentiert Ahmed den langen Vortrag, „Danke für den Einblick, den wir erhalten durften.“ Viktoria schloss sich dem an. Wolfgang lachte. „So, nun könnt

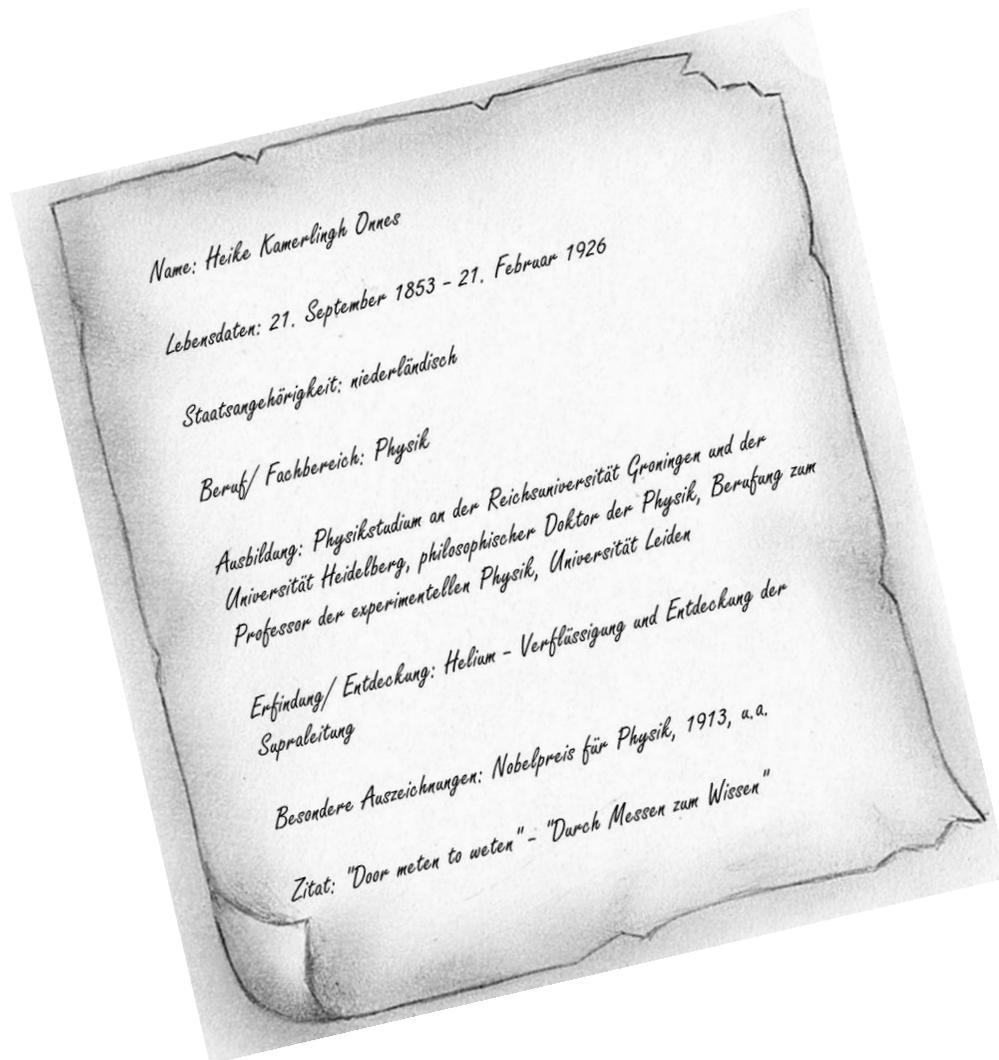
ihr an eure Aufgaben gehen! Viel Erfolg wünsche ich euch. Ich denke, ihr schafft das, aber falls ihr Fragen haben solltet, scheut euch nicht, sie mir zu stellen“, schob Wolfgang noch nach.





Nach einiger Zeit versperrt ihnen eine Wand den Weg. „Hier sind wir wohl falsch“, meint Viktoria nur trocken. „Da könntest wohl Recht haben“, entgegnet Ahmed lachend, „lass uns umkehren!“

[Kehrt zu Seite 38 zurück und überlegt noch einmal genau!](#)



Dieser Gang ist viel kürzer. Wie immer endet er mit einer Tür, die sie öffnen, in der Hoffnung einen Schritt weiterzukommen.

Sie kommen in einen Raum, viel kleiner als Carls Werkhalle. Es scheint sich um ein Labor zu handeln, ist aber gleichzeitig auch ein Büro. Ahmed steht wie erstarrt da und blickt auf den Unbekannten: „Viktoria, weißt du, wer das ist? Das ist der berühmte Heike Kamerlingh Onnes, Nobelpreisträger, Entdecker der Supraleiter und der Suprafluidität.“ „Aha, bin ich das? Der Name stimmt, aber der Rest, über den ihr da spricht, ist mir unbekannt“ schmunzelte Heike. „Oh“, Viktoria dachte nach, „das habe ich auch mal bei Wikipedia gelesen, aber die Entdeckungen waren erst 1911.“

Lest auf der nächsten Seite weiter!

„Wir schreiben gerade das Jahr 1908, ich weiß nicht, wovon ihr redet, aber schön zu wissen, dass ich einmal in einem Lexikon Erwähnung finden werde. Ich habe gerade einige Experimente beendet, z.B. habe ich mich in Anlehnung an meinen deutschen Kollegen Linde mit der Abkühlung von Gasen befasst. Ich hatte erstaunliche Erfolge mit Helium, habt ihr davon auch etwas gehört?“, fragte Heike.

„Oh ja“, meint Ahmed auch prompt, „Sie haben Helium verflüssigt und konnten somit eine Temperatur von 4 K erzeugen. Die tiefste bis dahin erreichte Temperatur.“ Lachend ergänzte Heike: „Mir ist es sogar gelungen, Helium noch weiter runter zu



kühlen, bis auf 0,95 K!“ Viktoria ist beeindruckt: „Und wie geht es jetzt weiter?“ „Naja, ihr müsst ja in eure Zeit zurück, aber vielleicht könnt

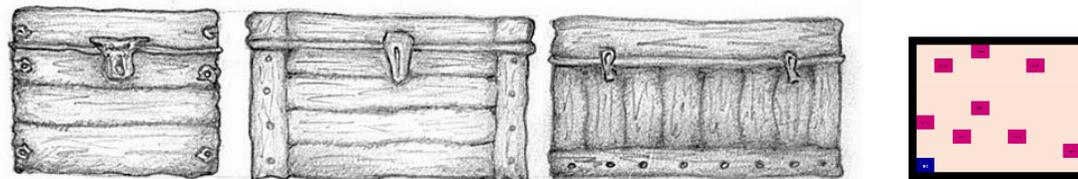
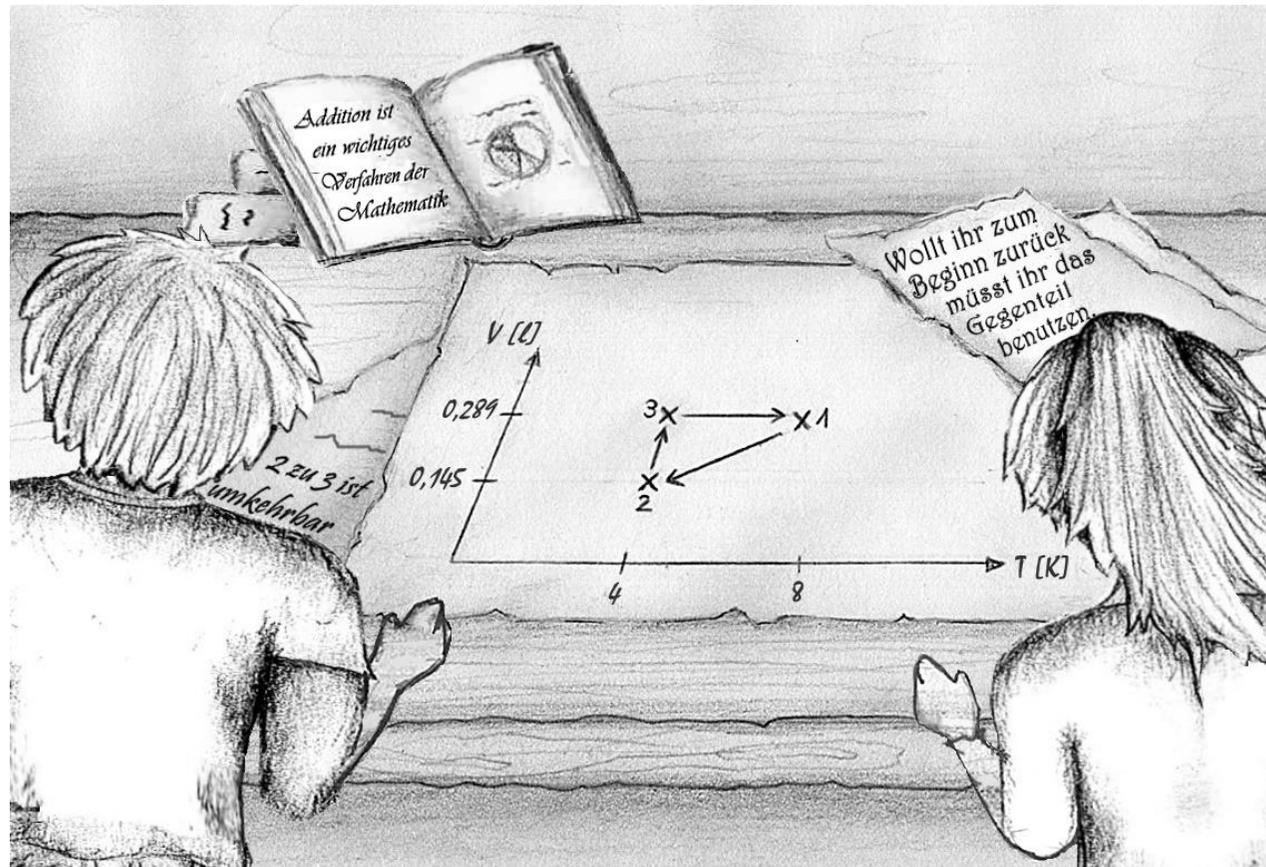
ihr mir vorher noch bei ein paar Rechnungen helfen. Sie liegen dort hinten“, bittet Heike. „Machen wir doch gerne“, antwortete Ahmed sofort, „wer von unseren Kommilitonen kann schon behaupten, jemals mit solch einem berühmten Menschen zusammen gearbeitet zu haben!“ Heike geht wieder an seine Arbeit und lässt

die beiden Studierenden machen.

Öffnet Seite 32.

„Hm“, meint Ahmed, das war mal harte Arbeit, das müsste jetzt aber richtig sein, wenn wir uns nicht verrechnet haben.“

Viktoria schaut auf: „Ist richtig, da vorne zeigt sich eine Tür!“ Nach einem kurzen „Tschüss“ in Richtung Heike rennen sie hinaus.

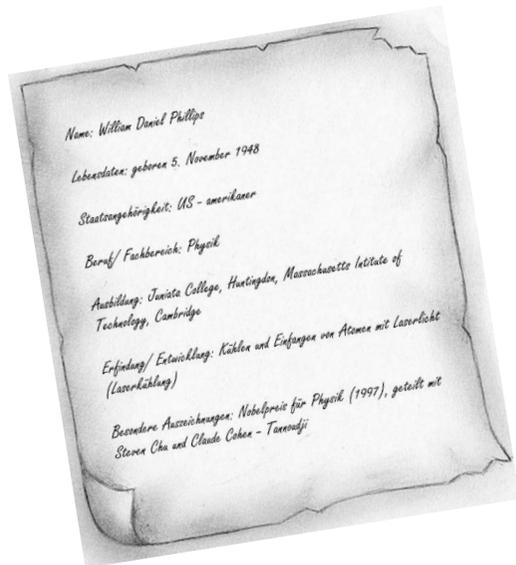




Erneut kommen sie zu einer Tür. Ein Blick durch das Fenster zeigt ihnen, dass sie dort richtig sind, und sie betreten den Raum. „Das ist hier irgendwie komisch“, meint Viktoria, „ich - mir ist irgendwie schwindelig. Ich habe den Eindruck, mich gleichzeitig in mehreren Räumen zu befinden.“ „Mir geht es genauso“, ergänzt Ahmed, „Es ist, als ob sich manchmal die Räume trennen wollen, es aber nicht können.“ Vor ihnen erscheinen 3 Männer. Der eine hat dunkles Haar, einen dunklen Vollbart und sieht eher so aus, als ob er sich in der freien Natur am wohlsten fühlt, der zweite bleibt völlig verschwommen und der dritte ist ein Mann in den mittleren Jahren, schlank mit einer

modernen Kurzhaarfrisur. Der Vollbart-Typ meldete sich zuerst: „Guten Tag, mein Name ist William Phillips, die anderen beiden sind quasi Kollegen: David E. Pritchard und sein Nachfolger Wolfgang Ketterle. Euer Gefühl trägt euch nicht. Dieses Phänomen erlebt ihr, weil wir zeitgleich leben, und innerhalb weniger Jahre unsere Kühlungsmethoden entdeckt haben. Ihr habt es also schon fast geschafft, trotzdem müsst ihr nun noch durch unsere Räume und die Rätsel lösen, damit ihr auch noch die letzten Jahre bis in eure eigene Zeit zurücklegen könnt. Am besten wäre es, ihr würdet bei mir beginnen, dann zu David und Wolfgang gehen. Dazu müsst ihr diesmal keine Türen zum Vorschein bringen und euch in Gängen verlaufen.“ Er lacht, als er die betretenen Gesichter von Viktoria und Ahmed sieht, und fährt fort: „Wenn ihr meine Hand nehmt, verschwinden die anderen beiden im Nebel, nur mein Raum wird klar und deutlich. Ihr könnt die Anwesenheit der anderen aber auch weiterhin spüren. Lasst euch dadurch nicht ablenken. Solange ihr einen körperlichen Kontakt zu mir herstellt, wird dieser Zustand anhalten. Wenn ihr loslasst, stellt sich sofort wieder dieser diffuse Zustand ein und euch wird übel. Wenn ihr die Aufgaben bei mir gelöst habt, dann wird sich automatisch der Zustand ändern. Ihr werdet sehen“

Lest bis Seite 36.



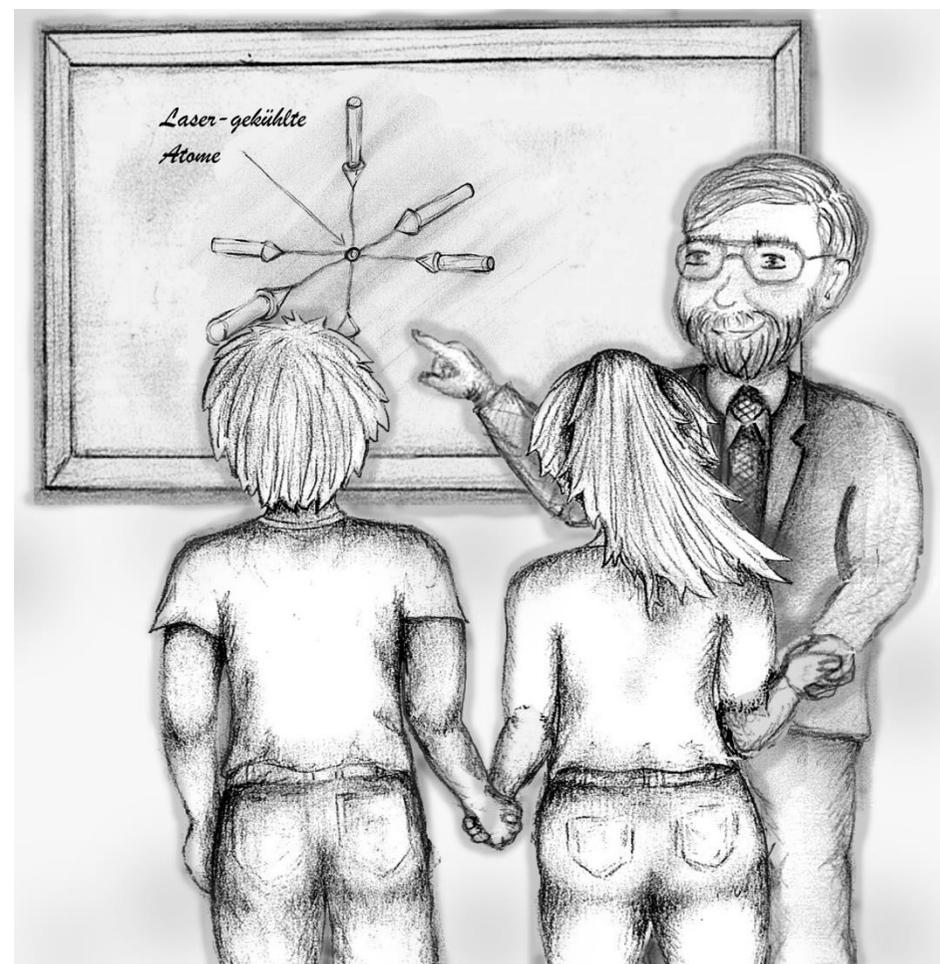
Ahmed und Viktoria verständigen sich mit stummen Blicken. Ahmed legt seine Hand auf Davids Schulter und es ist wie in den anderen Räumen vorher auch. Alles ist klar zu erkennen. Erschrocken nimmt er seine

Hand wieder weg und der diffuse Zustand stellt sich sofort wieder ein. „Lass das!“, schimpft Viktoria, „Mir wird ganz schlecht davon.“ Sie greift nach Williams Hand und es wird wieder klar. „Ich kenne Sie noch nicht, aber Sie werden uns sicherlich gerne erzählen, welche Kühlmethode die ihre ist und wie weit sie damit an den Nullpunkt kommen, oder?“, sieht Viktoria verschmitzt zu ihm hoch, immer noch seine Hand haltend. „Sicher doch“, antwortet ihr William lächelnd, „ich hatte in den 1990er Jahren beachtliche Erfolge mit der Laserkühlung.“ „Haben sie dafür nicht auch den Nobelpreis bekommen“, findet Ahmed seine Sprache



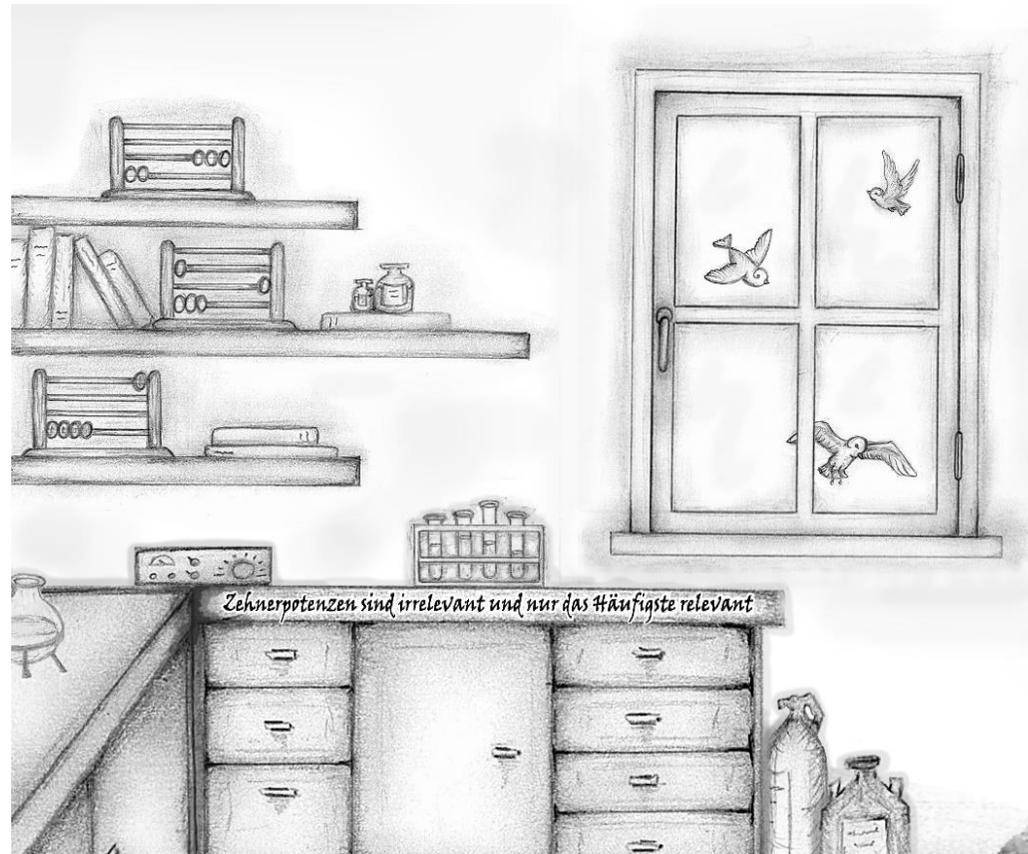
wieder. „Ja, 1997“, bestätigt William. „Und wie funktioniert so eine Laserkühlung?“, will Viktoria wissen. „Ich versuche es mal einfach zu erklären“, fängt William an.

„Das Ganze beruht darauf, dass Photonen von Atomen absorbiert werden. Dabei werden Elektronen in der Außenhülle auf ein höheres Energieniveau gehoben, also angeregt. Gleichzeitig mit dem Zerfall dieser Anregung wird das Photon wieder emittiert, und zwar in eine beliebige Richtung. Dies wiederum erzeugt einen minimalen Rückstoß. Wenn man nun mittels eines Lasers kontinuierlich Photonen auf das Atom schießt, werden viele Photonen aufgenommen und auch wieder abgegeben, so dass es viele Rückstöße gibt, die in ihrer Summe einen bemerkbaren Effekt auf die Geschwindigkeit des Atoms haben. Um jetzt aber die Kontrolle über den ganzen Vorgang nicht zu verlieren, findet das Ganze in einer magneto-optischen Falle statt. Die ist aber eine Erfindung meines Kollegen Pritchard, den ihr schon kennen gelernt habt. Diese Falle hilft dabei, die gekühlten Atome, die ja aus dem Kühlbereich diffundieren können, mit Hilfe eines inhomogenen Magnetfeldes zu konzentrieren. Eine Wirkung auf die Atome hat das Magnetfeld nicht direkt. Es übt keine Kraft auf die Atome aus, regt diese nur an und hat sozusagen eine Unterstützungsfunktion für die Laser. Wie ihr ja wisst, ist der absolute Nullpunkt genau dann erreicht, wenn die Freiheitsgrade in einem Atom alle gleich Null sind, es also überhaupt keine Bewegung mehr in einem Atom gibt. Wenn man nun

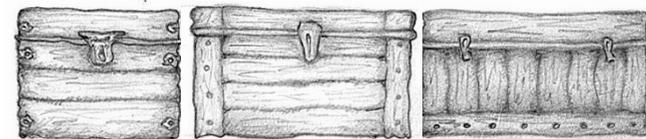
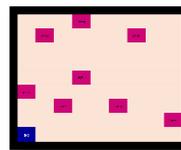


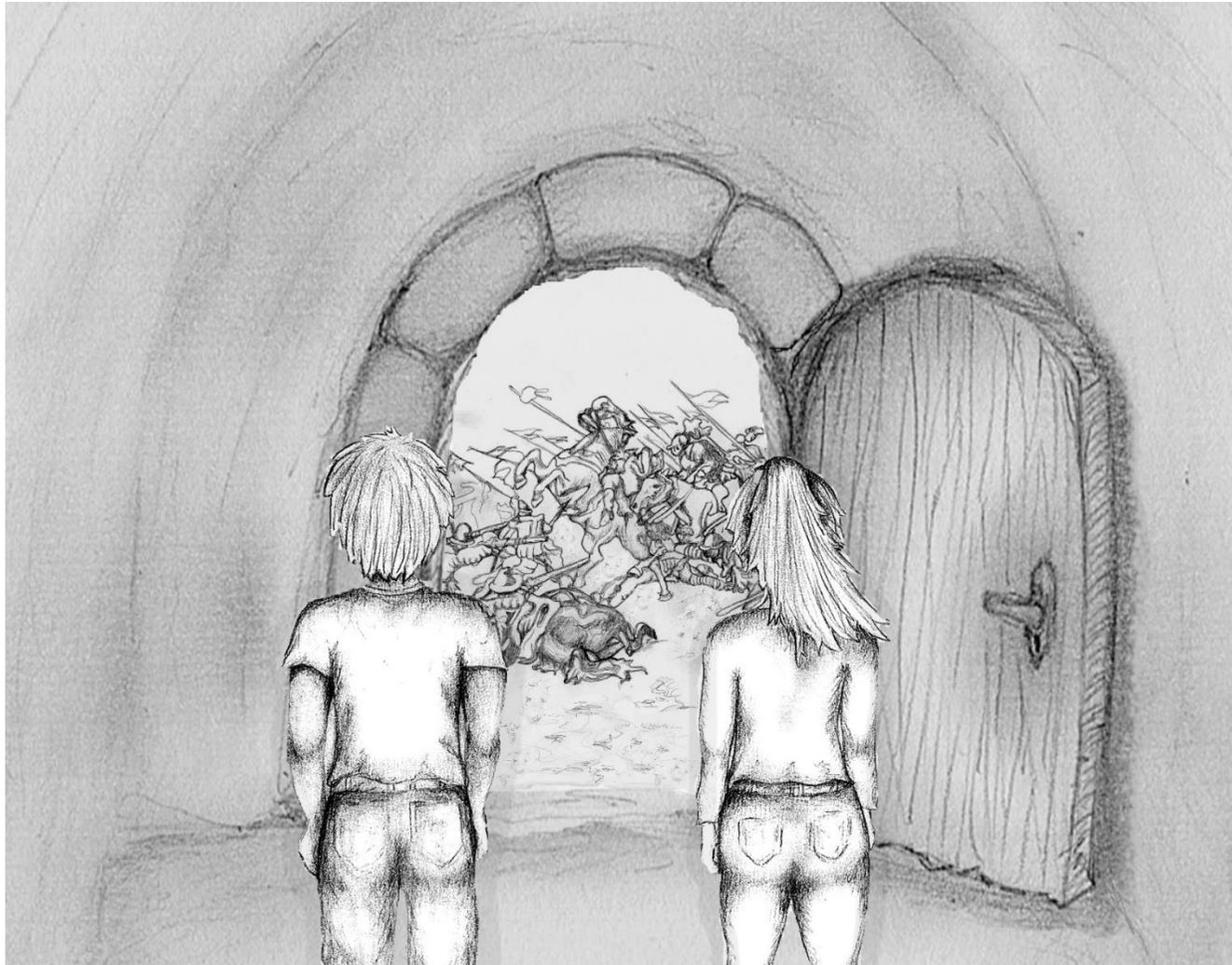
mit 3 Laserpaaren arbeitet, die sich jeweils gegenüberstehen, dann wird ein Atom aus allen 6 Richtungen, also von oben, unten, rechts, links, vorne und hinten, abgebremst.“

„Cool“, wirft Viktoria ein, „Damit kommen Sie ja bis zum absoluten Nullpunkt.“ „Nein“, meint William dazu, „Leider nicht. Durch das Aufeinandertreffen von Atom und Photon tritt der sogenannte Doppler-Effekt ein. Das jetzt zu erklären, führt an dieser Stelle zu weit. Nur noch eine kurze Erklärung, warum es trotzdem noch Bewegung in den Atomen gibt. Durch die ständige Photonenemission beginnen die Atome zu zittern und das erhöht die Temperatur wieder. Durch das Aussenden eines Photons erhält ein Atom einen Rückstoß, welcher das Atom wieder beschleunigt. Daher können die Atome nicht vollständig zur Ruhe kommen. Aber du hast nicht ganz Unrecht. Man kann auf diese Weise schon eine ziemlich tiefe Temperatur erreichen. Wir bremsen die Atome auf eine Geschwindigkeit von 50 Zentimeter pro Sekunde ab und erreichen dadurch eine Temperatur von 200 mikroKelvin.“ „Echt jetzt?“, Ahmed ist erstaunt, „200 Millionstel Kelvin? Für mich wäre damit der Nullpunkt schon erreicht.“ William fängt lauthals an zu lachen: „Junger Mann, wenn du in der Wissenschaft Erfolg haben willst, musst du immer genau arbeiten. Und 200 Millionstel ist definitiv nicht Null!“ Ahmed und Viktoria schauen betreten, aber William muntert sie auf: „Aber eure Aufgaben könnt ihr bestimmt lösen. Habt ihr sie schon gefunden?“



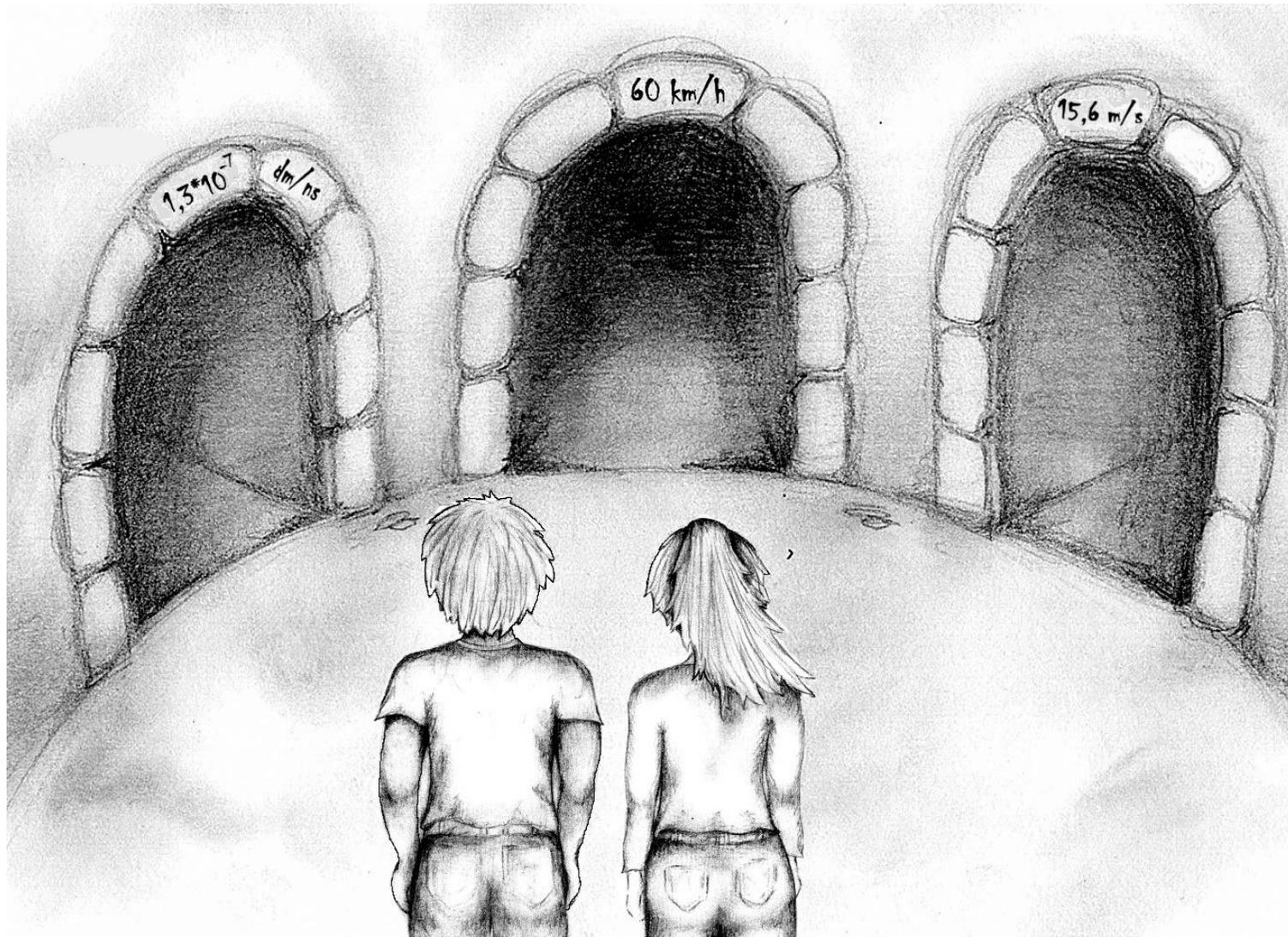
Ohne seine Hand loszulassen, beginnen die beiden die Aufgaben zu suchen. Schon bald sind diese gefunden und gelöst.





Sie laufen weiter und kommen an eine Tür. Ahmed warnt: „Nur öffnen und reinschauen, es könnte die falsche Zeit sein.“ Viktoria öffnet die Tür und bleibt stehen. Vor ihr breitet sich ein Schlachtfeld aus. „Sowas habe ich mal auf einem Gemälde gesehen. Das muss sich um die Zeit des Dreißigjährigen Krieges handeln. Hier sind wir wohl falsch!“

[Kehrt zu Seite 38 zurück und denkt noch einmal über euer Ziel nach!](#)



Die Gänge sehen alle gleich aus. Auch in diesem kommen sie nicht weit, denn schon bald stehen sie wieder vor einer Weggabelung. Diesmal gibt es drei Möglichkeiten. Für welchen Weg sollen sich die beiden entscheiden?

Sie entscheiden sich für rechts ([weiter auf Seite 29](#))

Sie entscheiden sich, geradeaus weiter zu gehen ([weiter auf Seite 37](#))

Sie entscheiden sich für links ([weiter auf Seite 8](#))

## Allgemeine Hinweise

Um das Buch und die Rätsel so gut wie möglich lösen zu können, beachtet die folgenden Hinweise. Sie werden euch helfen und das Rätseln erleichtern.

1. Das gesamte Buch ist gespickt von Verlinkungen. Sind diese in Schriftzeichen versteckt, wird die Verlinkung deutlich, in dem die entsprechenden Stellen unterstrichen sind. Es gibt aber auch Bilder, welche Verlinkungen enthalten (z.B. die Kisten). Probiert es einfach mal aus und schaut, wo ihr landen werdet.
2. Im Rahmen der Rätsel werden immer wieder Werte unterschiedlicher Einheiten miteinander verrechnet werden müssen, um die passenden Lösungszahlen zu erhalten. Natürlich ist dieses Vorgehen nicht wissenschaftlich korrekt, doch im Sinne des Spiels kann davon ausgegangen werden, dass es sich stets um dimensionslose Werte handelt. (Dennoch ist es in Anbetracht des fachlichen Verständnisses natürlich ratsam, sich zu überlegen, welche Einheiten die berechneten Einzelwerte haben.)
3. Ebenso wie die Einheiten fallen auch Vorzeichen weg. Es wird also stets mit Beträgen gerechnet werden.
4. Die Stoffmenge beträgt, sofern nicht anders angegeben, stets 1 mol.
5. Die Signifikanz ändert sich von Rätsel zu Rätsel, hierbei keine Fehler zu machen ist jedoch essenziell für die richtige Lösung. Daher werden die Nachkommastellen (NKS) für die fehleranfälligen Rätsel bereits jetzt gegeben. Notiert sie euch am besten und legt sie neben euch, damit ihr daran denkt, sobald ihr diese Informationen benötigt:

Seite 10: 2 NKS

Seite 18: 4 NKS

Seite 32: 1 NKS

Seite 36: 2 NKS

Zum Schluss möchte ich noch einmal darauf hinweisen, dass dieses Buch vollständig korrekt ist, die Themen jedoch an der einen oder anderen Stelle didaktisch reduziert wurden. Auch die Tipps sind alle richtig, stellen aber nur Hinweise für die Rätsellösungen, keine wissenschaftliche Abhandlung dar.

[Beginnt nun auf Seite 6.](#)

## Codematrix

Um euren dreistelligen Code zu überprüfen und die Geschichte fortzuführen, beginnt in der Matrix beim Feld START und geht nach den Anweisungen vor. Probiert zu Beginn den Beispielcode aus, um sicherzustellen, dass ihr die Matrix richtig verwendet.

1. Ziffer: X Felder nach rechts zählen
2. Ziffer: X Felder nach unten zählen
3. Je nach Ziffer die Aktion in der Liste durchführen

Beispielcode: 576

|                 |  |                |                 |  |                 |                 |  |                 |
|-----------------|--|----------------|-----------------|--|-----------------|-----------------|--|-----------------|
| START           |  |                |                 |  |                 |                 |  |                 |
|                 |  |                |                 |  |                 |                 |  | <u>Seite 24</u> |
|                 |  | <u>Seite 7</u> |                 |  | Beispiel        |                 |  |                 |
| <u>Seite 22</u> |  |                |                 |  |                 |                 |  |                 |
|                 |  |                | <u>Seite 14</u> |  |                 |                 |  |                 |
|                 |  |                |                 |  | <u>Seite 33</u> |                 |  |                 |
|                 |  |                |                 |  |                 |                 |  |                 |
|                 |  |                |                 |  |                 | <u>Seite 19</u> |  |                 |
|                 |  |                |                 |  |                 |                 |  |                 |
|                 |  |                |                 |  | <u>Seite 38</u> |                 |  |                 |

- |                                |                               |
|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>0:</b> 4 Felder nach oben   | <b>5:</b> 6 Felder nach unten |
| <b>1:</b> 2 Felder nach unten  | <b>6:</b> 4 Felder nach links |
| <b>2:</b> 3 Felder nach unten  | <b>7:</b> 2 Felder nach oben  |
| <b>3:</b> 2 Felder nach links  | <b>8:</b> 3 Felder nach links |
| <b>4:</b> 4 Felder nach rechts | <b>9:</b> 2 Felder nach unten |

## Anhang - Tipps

Tipp 1:



**Seite 6:** Gesucht sind die Koordinaten des Tripelpunktes

**Seite 10:** Im ersten Schritt benötigt es 6 Einzelwerte

**Seite 13:** Benötigt werden 3 Bilder und 3 Sätze, das Rätsel löst sich, wie man liest.

**Seite 18:** Das wichtige Element ist in zweifacher Form Bestandteil einer weitreichenden Kühlmethode

**Seite 28:** Gefunden werden müssen 8 Hinweise.

**Seite 32:** Der Druck muss nicht bezahlt werden.

**Seite 36:** Statt mit Vögeln kann man auch mit Kugeln Mathe lernen.

Tipp 2:



**Seite 6:** Der Tripelpunkt ist der Punkt, an dem sich die drei Phasengrenzlinien schneiden

**Seite 10:** Gesucht sind die 3 verschiedenen Molekülgeschwindigkeiten von  $N_2$  und  $O_2$ . Für die richtige Lösung müssen die Geschwindigkeiten der einzelnen Moleküle addiert und die Quersummen der Summen multipliziert werden.

**Seite 13:** Zu den Graphen müssen die richtigen Formeln gefunden werden, wobei Hinweise wie „Steigung“ zu beachten sind. Danach ergibt sich die Lösung fast von allein

**Seite 18:** Gesucht werden die Materialkonstanten  $a$  und  $b$  des Elementes Helium.

**Seite 28:** Alle Lösungen befinden sich in diesem Buch oder euren Thermodynamik-Aufzeichnungen.

**Seite 32:**  $W = - \int_{V_1}^{V_2} p dV;$        $W = -p_{ex} \int_{V_1}^{V_2} 1 dV$

**Seite 36:** Gesucht ist die Entropie des wahrscheinlichsten Mikrozustandes

Tipp 3:



**Seite 6:**

Dieser Punkt liegt bei  $T = 273 \text{ K}$ ;  $p = 600 \text{ Pa}$  → durch Addition der (einheitslosen) Zahlenwerte

→ 873 in der Codematrix

**Seite 10:**

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}; v_{max} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}; \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

$$\bar{v}_{N_2} = 474,92 \frac{m}{s}; \quad \bar{v}_{O_2} = 444,25 \frac{m}{s}$$

$$v_{max,N_2} = 420,78 \frac{m}{s}; \quad v_{max,O_2} = 393,61 \frac{m}{s}$$

$$\sqrt{\bar{v}^2}_{N_2} = 515,35 \frac{m}{s}; \quad \sqrt{\bar{v}^2}_{O_2} = 482,07 \frac{m}{s}$$

→ 312 in der Codematrix

**Seite 13:** **Isotherm** (ges.: Größtes Polynom in der Ableitung):

$$p = nRT \frac{1}{V} \rightarrow \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T = -\frac{nRT}{V^2}$$

**Isobar** (ges.: Häufigkeit der Temperatur in der Ableitung):

$$V = \frac{nR}{p} T \rightarrow \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{nR}{p}$$

**Isochor** (ges.: Anzahl Naturkonstanten):

$$p = \frac{nR}{V} T \rightarrow \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = \frac{nR}{V}$$

→ 201 in der Codematrix

**Seite 18:**

$$V_C = 3b; \quad p_C = \frac{a}{27b^2}$$

$$\rightarrow a_{He} = 0,0340 \frac{\text{bar} \cdot \text{dm}^6}{\text{mol}^2}; \quad b_{He} = 0,0237 \frac{\text{dm}^3}{\text{mol}}$$

→  $a+b$  (im Sinne des Spiels: einheitslos) = 0,0577

→ 577 in der Codematrix

**Seite 28:**

1. R; 2. R; 3. F; 4. F; 5. R; 6. F; 7. F

Durch Addition aller Lösungszahlen

→ 338 in der Codematrix

**Seite 32:**

Der Weg von Punkt 2 zu Punkt 3 ist eine reversible, isotherme

Expansion und folgt der Formel:  $-nRT \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = -22,9 \text{ J/mol}$

Der Weg von Punkt 1 zu Punkt 2 ist eine irreversible isobare

Kompression und folgt der Formel:  $-nR(T_2 - T_1) = -33,3 \text{ J/mol}$

Durch Addition der (einheitslosen) Zahlenwerte ergibt sich 56,2.

Der Weg von Punkt 3 zu Punkt 1 kann nicht berechnet werden, da keine Volumenarbeit geleistet wird.

→ 562 in der Codematrix

**Seite 36:**

$$S = k \ln(\Omega); \quad \Omega = \frac{5!}{x!y!z!a!b!}$$

Mikrozustand 2 hat die meisten Möglichkeiten/die höchste

Wahrscheinlichkeit einzutreten → Entropie am größten.

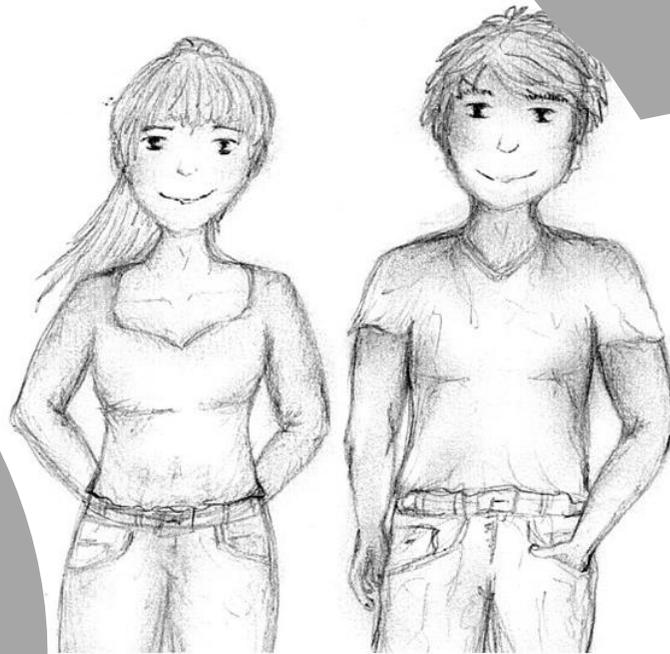
$$\rightarrow S(2. \text{MZ}) = 4,14 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

→ 414 in der Codematrix

Ach, doch, das glaube ich schon, aber zumindest nicht so schnell. Dank euch haben wir es wenigstens hinbekommen, die Protokolle alle rechtzeitig fertig zu machen und haben sogar alle bestanden. Ihr auch?

Jetzt müssen wir uns auf die Klausuren vorbereiten. Wir wünschen euch viel Erfolg, wenn ihr ähnliche Pläne habt.

Tschüss!



Vielen Dank, dass ihr uns geholfen habt, wieder in unsere Zeit zurück zu kommen. Ohne euch hätten wir das sicher nicht geschafft.