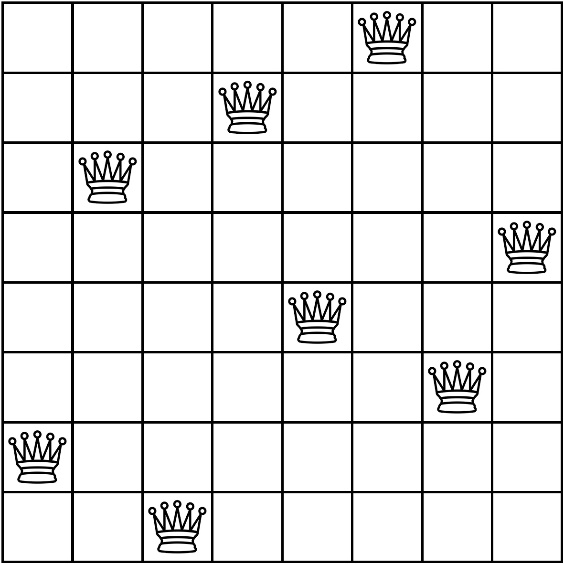
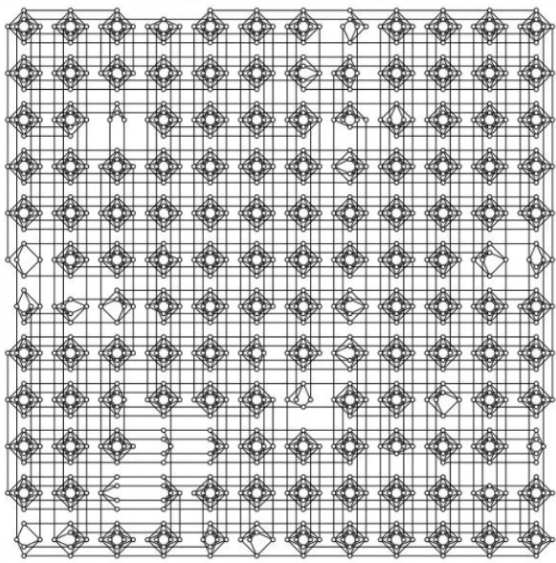
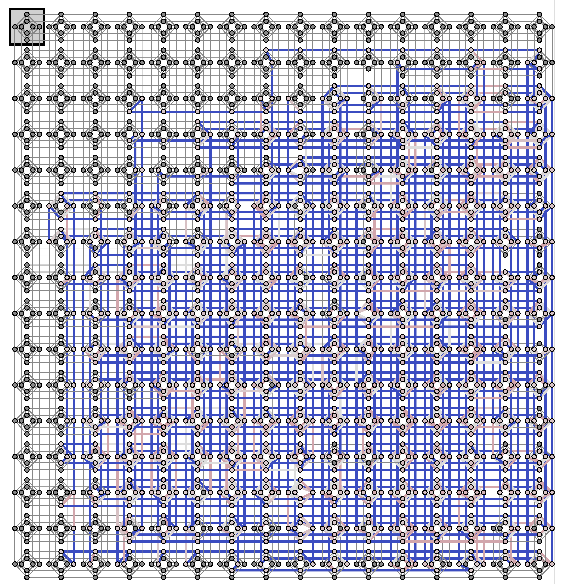
Lösung des n-Damenproblems auf einem adiabatischen Quantencomputer



Jakov D. Wallbrecher, Jonathan Treffler & Paul Schappert

Gymnasium der regensburger domspatzen | regensburg

# Projektüberblick

Auf einem n x n großen Schachfeld sollen n Damen so aufgestellt werden, dass keine Dame eine andere bedroht. Dieses bekannte Problem haben wir auf einem echten Quantencomputer gelöst. Bei unserem Projekt geht es aber weniger um das Finden der richtigen Lösung des n-Damenproblems (hierfür gibt es bereits viele gut geeignete Algorithmen), sondern um den Weg: die Aufbereitung des Problems zur Ausführung auf einem Quantum Annealer (hierzu später mehr). Das n-Damenproblem ist bisher von niemandem für einen Quanten-Annealer adaptiert worden.

Für unser Vorhaben, die Aufgabenstellung auf einen Quantencomputer zu übertragen, mussten wir das Damenproblem zuerst in die Sprache der Mathematik übersetzen. Es galt eine Funktion zu finden, der die Positionen aller Damen auf dem Schachbrett übergeben werden und die für die eingegebene Konstellation einen Wert, eine Bewertung der Situation zurückgibt, die man in der Optimierung als Energie der Verteilung bezeichnet. Diese Funktion muss für die korrekte Lösung des Problems minimal sein, da der Quantencomputer von Natur aus einen möglichst energiearmen Zustand anstrebt, sodass man, wenn er „gerechnet“ hat, die Lösung des Problems an den entsprechenden Werten der Qubits (Äquivalent zu herkömmlichen Bits auf einem Computer) ablesen kann, deren Zustände in unserem Fall als boolesche Variablen fungieren.

Um die erschlossene Energiefunktion auf Korrektheit zu testen, haben wir auf klassische Optimierungsalgorithmen wie Simulated Annealing, Threshold Accepting, und den Great Deluge Algorithmus zurückgegriffen, mit denen man das Problem auf konventionellen Computern lösen würde. Diese konnten mit der getesteten Kostenfunktion alle eine Lösung des Problems finden, was grünes Licht für den ersten Test auf einem Quantencomputer bedeutete. Auf diesem haben wir unser „Programm“ dann ausgeführt. Die Rechenzeit auf dem für zehn Millionen Dollar erhältlichen Quantencomputer haben wir vom Forschungszentrum in Jülich (Prof. Dr. Kristel Michielsen) gestellt bekommen.

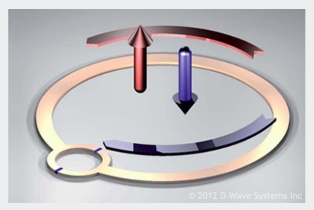
Wie genau ein adiabatischer Quantencomputer funktioniert, welche Probleme wir lösen mussten, um das Damenproblem für den Quanten Annealer umzuformen, und zu welchen Ergebnissen wir beim Ausführen des Programms gekommen sind, möchten wir im Folgenden genauer erläutern.

*Der D-Wave Quanten Annealer 2000Q, auf dem wir unsere Programme ausgeführt haben*

# Funktionsweise eines adiabatischen Quantencomputers

## Quantenbit auf einem Quantencomputer

Quantencomputer rechnen - anders als herkömmliche Computer - nicht mit normalen Bits, sondern mit Quantenbits, kurz „Qubits“. Im Gegensatz zu klassischen Bits können sich Qubits in einer Überlagerung der Werte 0 und 1 (quantenmechanisch: Superposition) befinden. Erst beim Auslesen des Zustands, das physikalisch einer Messung seines Werts entspricht, nimmt es einen der beiden Zustände mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit an. Diese Wahrscheinlichkeit kann durch Coupler beeinflusst werden. Ein Qubit befindet sich also quantenmechanisch im Zustand + , wobei a und b (komplexe) Zahlen sind, deren Betrag kleiner gleich 1 ist und für die gilt: a² + b² = 1. Beim Auslesen (Messen) des Qubits erhält man dann den Wert 0 mit einer Wahrscheinlichkeit von a² und 1 mit einer Wahrscheinlichkeit von b².



*Qubit auf einem D-Wave*

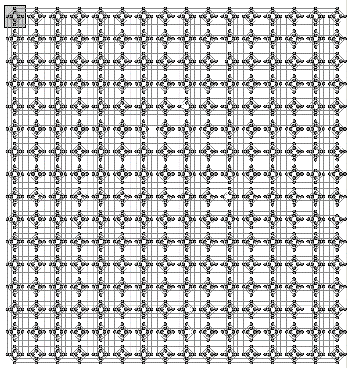
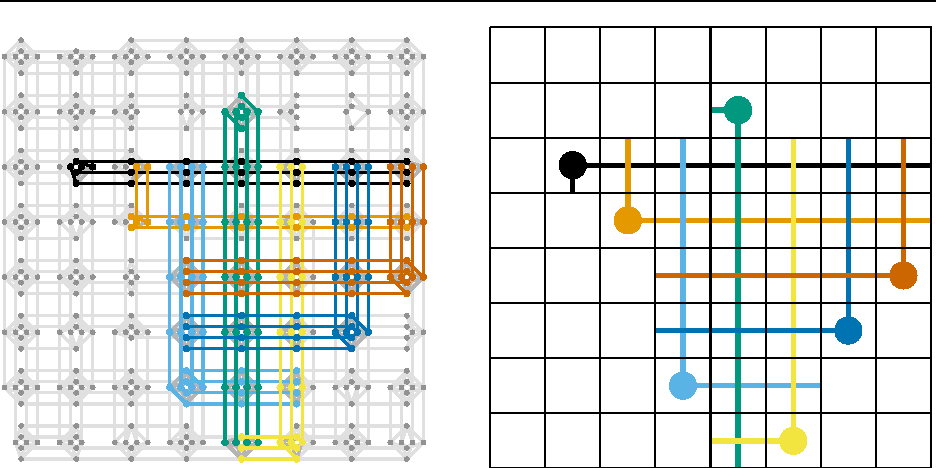
Qubits stellen einen Wert nicht wie Bits mit Transistoren durch Strom an oder aus dar, sondern durch den Spin (Drehrichtung) eines Elektrons, oder wie bei dem von uns verwendeten Rechner von D-Wave, durch die Flussrichtung des Stroms in einem supraleitenden Ring (siehe Abbildung rechts). Die Superposition entspricht also dem Fluss des Stroms in beide Richtungen.

Man unterscheidet zwei Arten von Quantencomputern: Universelle Quantengattercomputer, bei denen man jedes Qubit mit jedem anderen koppeln kann und adiabatische Quantencomputer, auch Quantum Annealer genannt. Letztere funktionieren wie folgt:

*"Gemäß den Gesetzen der Quantenmechanik bleibt ein quantenmechanisches System, das sich im Grundzustand (Zustand minimaler Energie) eines zeitunabhängigen Systems befindet, auch bei Veränderungen des Systems im Grundzustand, wenn die Veränderung nur hinreichend langsam (also adiabatisch) passiert. Die Idee des adiabatischen Quantencomputers ist es, ein System zu konstruieren, das einen zu dieser Zeit noch unbekannten Grundzustand hat, der der Lösung eines bestimmten Problems entspricht, und ein anderes, dessen Grundzustand leicht experimentell zu präparieren ist. Anschließend wird das leicht zu präparierende System in das System überführt, an dessen Grundzustand man interessiert ist, und dessen Zustand dann gemessen. Wenn der Übergang langsam genug erfolgt ist, hat man so die Lösung des Problems."* *[Eintrag auf Wikipedia, aufgerufen am 18.1.2019]*

Dieser Ansatz eignet sich deshalb gut um Optimierungsprobleme zu lösen, da man dazu "nur" eine Kostenfunktion aufstellen muss, die für die Lösung des Problems minimal ist.

## Chimera-Graph

Der sogenannte Chimera-Graph beschreibt die Verbindungen aller physikalischen Qubits auf einem D-Wave-Quanten-Annealer. Er zeigt alle aktuell aktiven Qubits (Ausfälle einzelner Qubits sind möglich) und deren Verbindungsmöglichkeiten zu anderen Qubits. Qubits können entweder mit dem Gleichheits- oder dem Ungleichheitscoupler gekoppelt werden. Auf einem adiabatischen Quantencomputer sind nicht alle physikalischen Qubits direkt miteinander verbunden (koppelbar). Um diesem Problem Abhilfe zu schaffen, werden mehrere physikalische Qubits zu logischen oder auch universellen Qubits zusammengefasst **beziehungsweise gekoppelt (siehe Abbildung unten).

Um ein logisches Qubit zu erhalten koppelt man mehrere physikalische Qubits mit dem Gleichheitscoupler, um mehr potentielle Verbindungen zu anderen, logischen Qubits zu ermöglichen. Diese kann man dann wiederum untereinander so verbinden, dass der Hamiltonian (zu Deutsch: Energiefunktion), der das Problem beschreibt, dargestellt wird. Es gibt leider kein „Erfolgsrezept“ um die physikalischen Qubits so zu koppeln, dass sich die entsprechenden logischen Qubits verknüpfen lassen. Daher hat die Firma D-Wave eine Library geschrieben, um das Embedding zu automatisieren, welche auch wir genutzt haben. Das Embedding ist für die Verbindung der physikalischen zu logischen Qubits verantwortlich.

*Chimera Graph und Koppelung einzelner physikalischer Qubits zu logischen Qubits (jede Farbe stellt ein logisches Qubit dar)*

## Hamiltonian und Energieberechnung

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | a | b | c | d |
| a | 0 | 0 | 0 | 0 |
| b | 1 | 0 | 0 | 0 |
| c | 0 | 0 | 0 | 0 |
| d | 0 | 0 | 0 | 0 |

|  |  |
| --- | --- |
| a | b |
| c | d |

*Beispiel für eine Hamiltonian-Matrix*

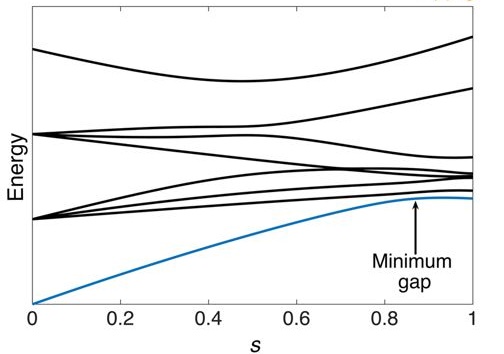
Der Hamiltonian bildet die Basis für die Koppelung der Qubits auf dem Chimera-Graphen. Er bildet - in Form einer Matrix - ab, welche Kombination der Zustände zweier Qubits bestraft oder belohnt werden soll. Wenn man also nicht möchte, dass zwei nebeneinanderliegende Felder besetzt sind (z.B. die Felder a und b) trägt man an der Position (a|b) der Matrix den Wert 1 an. Wenn dann zwei Damen auf diese beiden Felder gesetzt werden, bestraft der Hamiltonian dies mit 1. Alle diese „Strafen“ oder auch „Fehler“ entsprechen zusammen der vorher beschriebenen Energie.

Diese Energie wird auf Basis der Hamiltonian-Matrix H und eines Vektors berechnet, in dem die Werte der Qubits angetragen sind. Um jeden Qubit-Wert mit jedem anderen abzugleichen, muss also der Energie-Term folgendermaßen aussehen:

Das lässt sich per Summenzeichen erneut zusammenfassen:

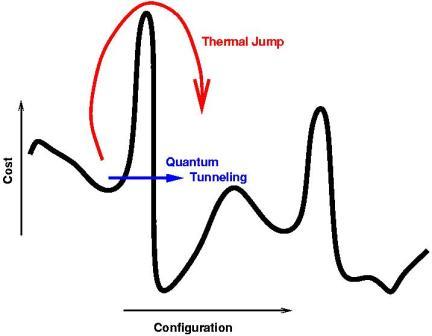
## Quantum Annealing

Ein Durchlauf eines Quantum-Annealing-Programms beginnt damit, dass mittels des Initial-Hamiltonian alle Qubits in Superposition „gesetzt“ werden. Dann wird der eigentliche problemspezifische Hamiltonian langsam „eingeblendet“. Dies geschieht durch eine Erhöhung von B bei gleichzeitiger Verringerung von A. Der Gesamt-Hamiltonian wird wie folgt berechnet:



*Minimum Gap in Zeit-Energie-Diagramm*

In der Grafik rechts sieht man (blau) den besten Energiezustand zu jedem Zeitpunkt des Annealing-Vorgangs. An der Stelle der Minimum Gap ist die Wahrscheinlichkeit, in einen schlechteren Zustand zu rutschen am größten. Je größer die Minimum Gap, desto leichter lässt sich das Problem mit einem Quantencomputer lösen.

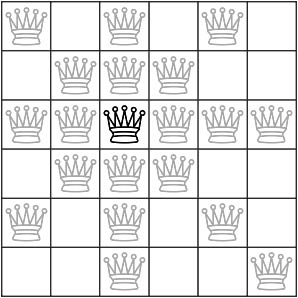


*Tunneling in einer Energielandschaft*

Durch quantenmechanische Gesetzmäßigkeiten ist es außerdem möglich, beim unendlich langsamen Übergang vom einen in den anderen Hamiltonian alle Erhebungen in der Energielandschaft zu tunneln (siehe Grafik rechts). In der Theorie kann man durch unendlich langsamen Übergang zwischen beiden Hamiltonians immer das beste Ergebnis erzielen. In der Praxis reichen allerdings oft wenige Mikrosekunden, um zu einem Ergebnis zu kommen!

# Das n-Damenproblem

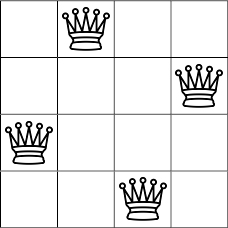
Das n-Damenproblem verlangt, auf einem nxn Felder großen Schachbrett n Schachdamen so anzuordnen, dass keine Dame eine andere bedroht. Eine Dame darf vertikal, horizontal und diagonal in alle Richtungen ziehen. Erstmals formuliert wurde das Problem 1848 von Max Bezzel, allerdings in Zusammenhang mit der Anzahl möglicher Lösungen für die Grundform n=8. Das Problem lässt sich sogar mit Bruteforce (Durchprobieren aller Möglichkeiten) in maximal Anläufen lösen. Mit etwas komplexeren heuristischen Optimierungsverfahren lässt sich selbst das 1000-Damen-Problem in angemessener Zeit lösen. Das besondere an unserem Projekt ist aber auch nicht das Lösen des Problems, sondern das „in-QUBO-Form-bringen“, wobei QUBO für Quadratic Unconstrained Binary Optimization steht.



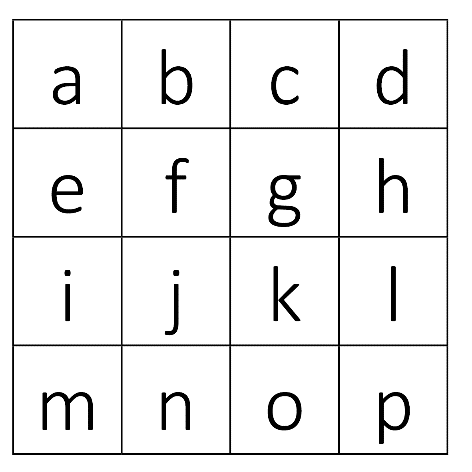
*Mögliche Bewegungsrichtungen einer Schachdame*

# Hamiltonian für das n-Damenproblem

Wir haben unseren Hamiltonian (siehe „Hamiltonian und Energieberechnung“) über einen Term erschlossen. Wir mussten dazu eine Funktion kreieren, die für die Lösung des Problems minimal ist. Diese Kostenfunktion kann dann in eine Matrix umgeformt werden. Das im Folgenden beschriebene Vorgehen haben wir mit einem selbstgeschriebenen Programm für ein beliebiges n automatisiert.



*Korrekte Lösung des 4-Damen-Problems*

Eine Schachdame darf vertikal, horizontal und in alle Richtungen diagonal ziehen. Das bedeutet, dass auf jeder Horizontale, Vertikale und Diagonale höchstens eine Dame stehen darf! Eine Diagonale darf aber auch frei bleiben.

Wir zerlegen die Erstellung der Funktion in ihre Einzelbestandteile und beginnen dazu bei den Horizontalen.

Auf einem n x n großen Schachfeld gibt es n Horizontalen, auf denen jeweils genau eine Dame stehen muss. Wir suchen also eine Funktion, die dann den geringsten Wert zurückgibt, wenn genau eine Dame auf der Horizontale steht. Dazu addiert man alle Felder der Horizontalen (0, wenn keine Dame; 1 wenn eine Dame), zieht 1 ab und quadriert dies, damit das Ergebnis bei einer Dame in der Horizontalen kleiner ist als bei 0 Damen oder mehr als eine Dame:

Nummerierung der Schachbrettfelder, die in der Formel angewendet wird

Dieses Vorgehen wendet man auf jede Horizontale an und addiert die Einzelergebnisse auf.

Das Gleiche wiederholt man für die Vertikalen. Das Vorgehen bleibt dabei konstant.

Auf den Diagonalen darf jeweils eine oder keine Dame stehen, da es immer Diagonalen pro Richtung (von links oben nach rechts unten oder von rechts oben nach links unten) gibt, von denen nur auf n eine Dame stehen kann.

Für eine oder keine Dame auf der Diagonale resultiert bei diesem Term eine Energie von 0.25, bei mehr Damen höhere Werte. Dasselbe gilt für die andere Diagonalrichtung. Die Eckfelder werden nicht berücksichtigt, weil die Gesamtenergie auf diesen Diagonalen nur 0 oder 1 sein, dort also ohnehin kein Fehler auftreten kann.

Am Beispiel des 4-Damen-Problems hier die erste vollständige Hamiltonian-Formel:

Es kommen im ganzen Hamiltonian nur die beiden beschriebenen Formeln vor. Diese kann man dann in eine Matrix umformen, die der Quantencomputer als Eingabe erwartet.

Da alle Variablen nur 0 oder 1 sein können, gilt: . Daraus folgt:

Der andere Term für die Bedingung „Genau eine oder keine Dame“:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | a | b | c | d | e | f | g | h | i | j | k | l | m | n | o | p |
| a | -2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| b | 0 | -2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| c | 0 | 0 | -2 | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| d | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| e | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| f | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| g | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| h | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| i | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| j | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| k | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 |
| l | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| m | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 2 | 2 | 2 |
| n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 2 | 2 |
| o | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 | 2 |
| p | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2 |

Die Konstanten 1 und 0.25 werden nicht beachtet, da sie lediglich eine Verschiebung des Energiegraphs an der y-Achse bewirken.

Der daraus resultierende Term der Form lässt sich sehr einfach auf eine Matrix der Größe  
 übertragen. Dazu wird beispielsweise für bei Feld (a|k) der Wert 2 eingetragen. Aus diesen Überlegungen resultiert die nebenstehende Hamiltonian-Matrix für das 4-Damen-Problem.

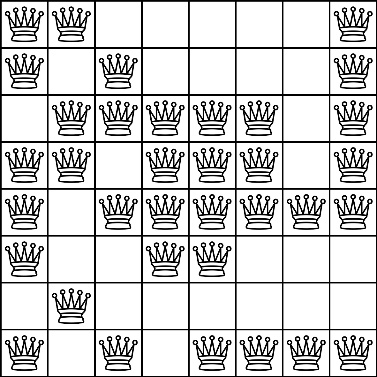
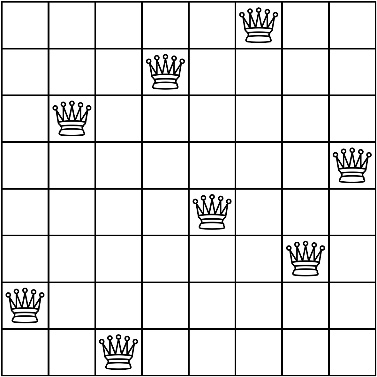
# Lösung des n-Damenproblems mit Optimierungsverfahren auf klassischen Computern

Rechenzeit auf einem Quantencomputer ist teuer und knapp. Daher haben wir vor dem Ausführen unseres Programms auf dem echten Quanten-Annealer den berechneten Hamiltonian mit mehreren Optimierungsverfahren getestet und diese verglichen. Die verwendeten Optimierungsverfahren wollen wir im Folgenden vorstellen.

Alle Algorithmen arbeiten mit dem gleichen Ansatz. Sie nehmen eine Änderung an der Ausgangssituation vor (hier: auf einem beliebigen Feld eine Dame wegnehmen/hinzufügen). Diese Änderung wird als Move bezeichnet. Dann wird die daraus entstandene Situation von einer Kostenfunktion bewertet und mit der Energie der vorherigen Konstellation verglichen. Der Zug wird daraufhin entweder angenommen oder wieder rückgängig gemacht. Der einzige Unterschied besteht in den variierenden Kriterien, die festlegen, ob der Zug angenommen wird oder nicht.

## Greedy-Algorithmus

Der Greedy-Algorithmus (englisch für gierig) nimmt eine Änderung nur dann an, wenn sie die Situation verbessert hat. Das führt allerdings bei vielen np-harten Problemen zu einer unzureichenden Lösung, da man in einem lokalen Minimum stecken bleiben kann. Trotzdem hat der simpelste unserer Testalgorithmen überraschend gute Ergebnisse geliefert. Die Anzahl der notwendigen Durchläufe schwankt bei gleicher Ausgangsbesetzung des Schachfelds sehr stark.



## 

## Threshold Accepting

Beim Threshold Accepting (englisch für Schwellenwertannahme) wird die Änderung nur dann angenommen, wenn die Differenz von neuer und alter Energie unter einem bestimmten Wert liegt. Dieser Schwellenwert wird nach jedem Durchlauf etwas herabgesetzt. So dürfen am Anfang noch mehr Situationsverschlechterungen vorkommen, wohingegen später fast ausschließlich Verbesserungen angenommen werden. Das macht es möglich, lokale Minima in der Energielandschaft zu überwinden und dadurch bessere Ergebnisse zu erzielen. Das Threshold Accepting gehört - im Gegensatz zum Greedy-Algorithmus - zu den heuristischen Optimierungsverfahren.

Aus der Grafik lässt sich entnehmen, dass sich der Energiezustand zuerst verschlechtert, um dann zum globalen Minimum zu finden.

## 

## Simulated Annealing

Beim Simulated Annealing (englisch für simuliertes Abkühlen) werden alle gewinnbringenden Moves angenommen, wobei auch eine Verschlechterung zu einer Wahrscheinlichkeit von angenommen werden darf. Der Parameter T ist die sogenannte Temperatur, welche nach jedem Durchlauf abgesenkt wird. Das erklärt auch den Namen Annealing (=Abkühlen). steht für die Energiedifferenz. Simulated Annealing überwindet lokale Minima in der Energielandschaft noch effizienter und mit höherer Wahrscheinlichkeit als Threshold Accepting, weshalb es für viele Probleme im Optimierungsbereich die erste Wahl ist.

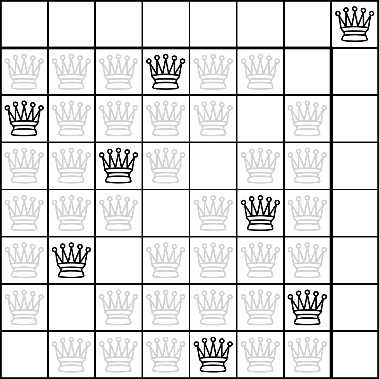
## Great Deluge Algorithmus

Der Great Deluge Algorithmus (englisch für Sintflut-Algorithmus) lässt eine Änderung dann zu, wenn die neue Energie unter einem bestimmten Wert liegt. Dieser wird nach jeder Änderung verringert. Der Sintflut-Algorithmus hat mit unserem Hamiltonian sehr schlechte Ergebnisse erreicht. Um eine Lösung zu finden benötigte er oft ein Vielfaches der Anzahl an Durchläufen im Vergleich zu den anderen Optimierungsverfahren.

# Auswertung der Ergebnisse des Quanten-Annealers

Wir haben auf dem Quantencomputer „DW\_2000Q\_2\_1“ die Hamiltonians für alle n von 4 bis 8 ausgeführt. Als Eingabewerte erhält der Quantencomputer - neben der Besetzung des Chimera-Graphen - die Anzahl der Durchläufe und die Dauer eines Durchlaufs. Diese Dauer beträgt standardmäßig 20 Mikrosekunden. Hier die Anzahl der richtigen Ergebnisse pro 10.000 Durchläufe:

Für n=8 lieferte der Quantencomputer kein einziges richtiges Ergebnis. Das lässt sich auf die nicht ausreichende Anzahl an zur Verfügung stehenden Qubits zurückführen. Der Quanten- Annealer von D-Wave hat nämlich 2048 physikalische Qubits, womit sich nur also rund 45 logische Qubits simulieren lassen. Für das 8x8 Feld brauchen wir jedoch 64 logische Qubits.   
  
Wir hatten uns aber vorgenommen, das klassische 8-Damenproblem auf einem Quantencomputer zu lösen. Um dies trotz der Begrenzung durch die Anzahl logischer Qubits möglich zu machen, haben wir uns überlegt, dass man zu einer Lösung des 7-Damen Problems mit freier Gesamtdiagonale einfach eine weitere Dame dazustellen kann (siehe Grafik). Dazu mussten wir unseren Hamiltonian um diese Information ergänzen. Von 10.000 Durchläufen auf dem Quantencomputer konnten wir tatsächlich 80-mal ein richtiges Ergebnis für diesen Spezialfall finden!



*Ergänzung des 7-Damen Problems zum 8-Damen Problem*

Abschließend soll erwähnt sein, dass die richtigen Ergebnisse pro 10.000 Durchläufe sehr stark schwanken, da der Quantencomputer nicht immer im besten Energiezustand endet. In den nächsten Jahren werden Quantencomputer sich voraussichtlich rasant weiterentwickeln, sodass diese Fehlerrate gesenkt werden kann. Erst dann wird man ihr ganzes Potenzial nutzen können und Quantencomputer werden in bestimmten Bereichen herkömmliche Computer überholen!

# Danksagung und Ausblick

Auch wenn die heute mit einem echten Quantencomputer lösbaren Probleme von eher überschaubarer Anzahl und Größe sind, so wird trotzdem damit gerechnet, dass in nicht allzu ferner Zukunft die sogenannte Quanten-Überlegenheit eintritt, also der Quantencomputer (in bestimmten Teilbereichen) effizienter arbeitet, als jeder heute existierende Supercomputer.

Wir bedanken uns bei unserem Projektbetreuer René Grünbauer für die Idee und den Kontakt zum Forschungszentrum Jülich. Außerdem möchten wir uns bei Prof. Dr. Kristel Michielsen vom Forschungszentrum Jülich für ihre Unterstützung und die Rechenzeit am D-Wave Quantencomputer bedanken. Nicht zuletzt wollen wir Herrn Dennis Willsch aus der Forschungsgruppe von Prof. Michielsen für die vielen Erklärungen und Hilfestellungen rund um die Benutzung und Steuerung des Quantencomputers danken.

Bis zum Präsentationstermin wollen wir uns noch der Lösung des „knights tour problem“ (zu Deutsch: Springerproblem) auf einem Quantencomputer annehmen. Bei diesem Problem es darum, auf einem Schachfeld eine Route finden, mit der ein Springer jedes Feld genau einmal besucht. Wir hoffen, dieses Schachproblem auf Basis unseres bisher erworbenen Wissens trotz der kurzen verbleibenden Zeit noch lösen zu können. Einen vielversprechenden Ansatz für einen QUBO-Hamiltonian haben wir schon gefunden.

# Quellen

* D-Wave Quantencomputer 2000Q: <https://www.theverge.com/circuitbreaker/2017/1/25/14390182/d-wave-q2000-quantum-computer-price-release-date>
* Darstellung des Spins eines Qubits: <https://www.nature.com/articles/nature10012/figures/1>
* Chimera-Graph (blau): <https://www.researchgate.net/figure/Chimera-the-graph-of-qubit-interactions-in-D-Waves-machine_fig1_263048587>
* Chimera-Graph Beispielkoppelung: <https://www.semanticscholar.org/paper/Fast-clique-minor-generation-in-Chimera-qubit-Boothby-King/39130a8ff551498da753acb0d9a3787f3f403b11/figure/1>
* Zeit-Energie-Diagramm eines Anneals: <https://www.nature.com/articles/s41534-018-0060-8/figures/1>
* Energielandschaft (Tunneling): <https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_annealing#/media/File:Quant-annl.jpg>
* Alle nicht genannten Grafiken sind selbst erstellt.