

GYMNASIUM MÜNCHENSTEIN

Maturaarbeit 2019

Die Stromversorgungssicherheit unter dem Aspekt der Netzsynchronisation

Simon Rohrbach

28.10.2019

Betreuung : Alexandre Warin



Foto: IWB / Gabi Mack

Abstract

In dieser Arbeit wird das Problem der Stromsicherheit angesprochen. Der Stromverbrauch nimmt immer stärker zu und das Stromnetz hat diese Unterschiede zwischen Produktion und Verbrauch stets auszugleichen. Die Risiken, welche dabei entstehen können, werden oft verschwiegen und sind uns überhaupt nicht bewusst. Das Ziel dieser Maturaarbeit ist es, die Auswirkungen bei wechselndem Bedarf aufzuzeigen. Dieser Ausgleich wird durch ein Programm aufgezeigt, in welchem die Netzsynchronisation vereinfacht dargestellt wird. Die Frage, welche ich mit der Arbeit versuchen werde zu beantworten, befasst sich mit den Kraftwerksinseln und der Veränderung der Frequenz. Wie funktioniert die Verbindung zwischen den Kraftwerksinseln, um sich gegenseitig auf einer stabilen Frequenz zu halten. Mithilfe des Programmes wird aufgezeigt, wie dieser Ausgleich zwischen den Kraftwerken stattfindet und welche Konsequenzen ein Kraftwerk, welches von der Frequenz abweicht, mit sich zieht. Der Plan für dieses Programm wurde in Excel vorbereitet und nach einem Test auf Octave geschrieben, um die Effizienz zu steigern.

In der Arbeit wird ersichtlich, wie komplex ein Programm wird, wenn jeder Einfluss der Realität miteinberechnet würde und dass eine Prognose für den Stromfluss nie exakt getroffen werden kann. Das Programm stellt den Stromausgleich vereinfacht mithilfe des Mittelwertverfahrens dar und es wird gezeigt, wie sich die Frequenz bei Abweichungen ausgleicht.

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

Abstract	1
Inhaltsverzeichnis	2
Vorwort	3
Begründung der Themenwahl	3
Dank.....	3
Einleitung.....	4
Projektbeschreibung	5
Leitfragen	6
Hauptteil.....	6
Theoretischer Hintergrund.....	6
Wasserkraft	10
Atomkraft	10
Energiepolitik Schweiz.....	11
Blackout/Stromausfall	12
Restart	14
Strommarkt	15
Material und Methoden.....	18
Delphi	18
Excel.....	19
GNU Octave.....	20
Resultate und Erkenntnisse.....	25
Versuch in Octave.....	25
Ungenauigkeit des Programmes	26
Schlusswort	26
Literaturliste	27
Abbildungsverzeichnis.....	28
Anhang	29
Octave(Matlab) Programmcode.....	29
Deklaration	51

Vorwort

Begründung der Themenwahl

Anlass zu dieser Arbeit gab mir hauptsächlich die steigende Nachfrage an Strom. Durch vereinzelte Stromausfälle in der Schweiz wurde das Thema Stromversorgung zu Beginn meiner Maturaarbeit medial verstärkt und ich wurde auf die Stromverteilung in Europa aufmerksam. Durch mein Interesse im Bereich Informatik nahm ich mir vor, mithilfe eines Programmes die Stromversorgung aufzuzeichnen und somit die Gefahren eines Blackouts auch für mein Umfeld ersichtlich zu machen. Schon vor einigen Jahren habe ich mich mit der Programmiersprache C# (C Sharp) auseinandergesetzt und fand Gefallen am Programmieren. Ich nahm mir somit vor, visuell auf einer Europakarte darzustellen, wie die Stromverteilung funktioniert und welche Risiken auftreten können.

Dank

An dieser Stelle danke ich all jenen, die mir durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung geholfen haben. Insbesondere danke ich meiner Betreuungsperson Herr Warin.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich immer wieder ermutigten und mich während der Arbeit moralisch unterstützt haben.

Einleitung

Der Strom ist in der heutigen Gesellschaft nicht wegzudenken. Der grösste Teil der Weltbevölkerung ist jederzeit auf Strom angewiesen und ihr ist nicht in geringstem bewusst, wie schnell es passieren kann, dass diese wertvolle Ressource ausfällt. Doch genau in dieser Situation liegt derzeit in der Schweiz eine grosse Gefahr. Das Problem liegt in der Unterversorgung im Winter, welche rund 30% beträgt.¹ Dennoch nimmt unser Stromkonsum zu und die Warnungen werden den Bürgern nicht klar ersichtlich. So kam es 2015/2016 zum Engpass beim Import von Strom, da die Schweiz intern durch Ausfälle nicht genug produzieren konnten.² Die Mangellage wurde durch rasche Massnahmen ausgeglichen, doch hiermit wurde auch ersichtlich, wie gross das Risiko eines grossflächigen Stromausfalls ist.

Da kommt der geplante Atomausstieg ungelegen, denn durch die Volksabstimmung vom 21. Mai 2017 wurde das Bewilligungsverbot für neue Atomkraftwerke mit 58% angenommen.³ Bis 2034 ist der komplette Atomausstieg der Schweiz geplant. Als Folge dieses Beschlusses muss mehr Produktion über alternative Energiegewinnung stattfinden oder der Stromimport gesteigert werden. Natürlich soll die Energie durch Zubau neuer erneuerbarer Energien gewährleistet werden, denn es ist geplant, die Produktion von 3,7 TWh bis 2050 auf 24,2 TWh zu erhöhen.⁴ Jedoch stehen dem Ausbau der Wasserkraft auch Landschaftsschutz und Restwassersanierungen im Wege. Auch bei der Windenergie ist die Energiegewinnung kleiner als angenommen und kann somit mit der bisherigen Verfügbarkeit ihre Produktion nicht steigern. Eine Möglichkeit wäre die Geothermie, welche aber noch nicht ausreichend entwickelt wurde, um die effizient einzusetzen. Somit wird auch auf Import ein Schwerpunkt gelegt werden müssen. Hierbei existiert schon eine enge Vernetzung zum Ausland und Leitungen und Transformatoren werden ständig ausgebaut. Kritisch wird nur die Frage, ob die Nachbarstaaten in der Lage sind, genügend Strom in die Schweiz zu exportieren, denn auch in Deutschland wird 2022 das letzte AKW stillgelegt und der Kohleausstieg steht auch schon in Planung.⁵

Zusätzlich geht Frankreich davon aus, dass sie selbst zum Nettoimporteure werden. Trotz steigender Effizienz und Neuschaffung von Kraftwerken ist der Handel zu Europa keinesfalls

¹ Hanspeter Huggenbühl (2018). Wie die Schweiz vom Stromimport abhängig wird.

² Swissgrid (2016). Bericht Winter 2015/2016.

³ Hanspeter Huggenbühl (2018). Wie die Schweiz vom Stromimport abhängig wird.

⁴ Helmut Stalder (2019). Die Schweiz steuert auf einen Strommangel zu.

⁵ Helmut Stalder (2019). Die Schweiz steuert auf einen Strommangel zu.

garantiert. Denn durch Rahmenabkommen der EU wird der Zugang zum Strombinnenmarkt Europas für nicht EU-Länder blockiert.⁶ Somit ist unsere Stromversorgung nicht sichergestellt. Als Instrument gegen Mangellagen schlägt der Bundesrat eine strategische Reserve vor. Hierfür sichert die Speicherung von vorrätiger Energie gegen Mangellagen ab. Jedoch wird mit dieser Methode kein zusätzlicher Strom generiert. Ein zusätzliches Problem besteht darin, dass der Strommarkt nicht genug Geld abwirft, um in Inlandkapazitäten zu investieren. Um dies zu erzielen, müssen finanzielle Entlastungen auf Wasserkraft gesetzt und Investitionen in Produktionsanlagen attraktiver gestaltet werden. Es ist jedoch Aufgabe des Bundesrats und des Parlaments, dies durchzusetzen. Dies wird die Schweiz einiges kosten, jedoch liegen die Kosten dafür immer noch viel tiefer als ein Nichthandeln. Dennoch wird die Mangellage vermutlich aus purem Opportunismus ignoriert.

Projektbeschreibung

Das Ziel meiner Arbeit ist, das Stromnetz Europas mithilfe einer Programmiersprache als Matrix darzustellen und mittels dieser aufzuzeigen, wie der Stromausgleich über einzelne „Kraftwerksinseln“ von statten geht. Dieses Programm wollte ich mittels RAD-Studio entwickeln. Geplant war ein Programm mit einer Benutzeroberfläche, welche mit der Maus bedienbar sein sollte und verschiedene Produzenten und Verbraucher gesteuert werden können. Während dessen Entwicklung stellte ich fest, dass der Aufwand für die Benutzersteuerung der zentrale Part wäre und der Ausgleich des Netzes sekundär wäre. Dies hätte den Rahmen einer Maturaarbeit weit übertroffen. Zudem wurde mir eine Bearbeitung mithilfe von Octave von einer Betreuungsperson empfohlen. Damit trotzdem eine ansprechende Darstellung möglich war, habe ich den Programmcode von Octave zusätzlich in Excel abgebildet. In Octave kreierte ich eine Matrix einer bestimmten Grösse, welche ich mit zufälligen Werten, welche der Frequenz der Kraftwerke entsprechen, einspeiste. Das Programm wird nun versuchen, die Werte in der Matrix mithilfe von Mittelwertbildung auszugleichen. Zusätzlich werden sogenannte „Frequenz-Fehler“ eingebaut, welche ein nicht ausgeglichenes (Frequenz nicht entsprechend der Sollfrequenz) oder durch Umwelteinflüsse geändertes Kraftwerk darstellen.

⁶ Helmut Stalder (2019). Die Schweiz steuert auf einen Strommangel zu.

Leitfragen

- Wie sind Kraftwerke untereinander vernetzt, damit sie sich ausgleichen können?
- Wie verhält sich das Stromnetz, wenn der Strombedarf sinkt oder steigt.

Hauptteil

Für die Erstellung des Programmes musste ich mir erst eine Grundbasis an Wissen erarbeiten. Die nachfolgenden Informationen dienen als Zusammenfassung zum Verständnis, wie ein solches Stromnetz aufgebaut ist, wie komplex es ist und welche Faktoren beim Ausgleich der Frequenz mit einbezogen werden müssen.

Theoretischer Hintergrund

Der Begriff Stromnetz ist die Bezeichnung für ein Netzwerk, welches der Übertragung und Verteilung elektrischer Energie dient. Hierzu gehören elektrische Leitungen und die dazu gehörigen Einrichtungen. Das Stromnetz wird in viele verschiedene Ebenen eingeteilt, welche mit ihrer jeweiligen Spannung funktionieren. Diese sind in sieben Ebenen unterteilt. In der ersten Ebene, der Höchstspannungsebene, fliesst der Strom von den Kraftwerken des In- und Auslandes von den grössten Kraftwerken in unser Übertragungsnetz. In dieser Ebene fliesst der Strom von den Produzenten mit 220/380 kV. In der siebten Ebene wird der Strom für Haushaltsverhältnisse verteilt. Auf dieser Ebene fliesst der Strom mit unter 1 kV Spannung und gibt somit der Ebene den Namen Niederspannungsebene. Die Ebenen 2-6 fungieren somit als Verbindung von Produzent zu Verbraucher, wobei die ungeraden Zahlen als Transportebenen dienen und die geraden Zahlen als Transformatorebenen. Wie in der unteren Abbildung ersichtlich wird, ist das Städtnetz über Transformatoren mit der Mittelspannungsleitung verbunden. In diese Ebene wird auch Strom von Solarkraft und Windkraft eingespeist. Diese Leitungen sind Verbindungsstücke für kleine Distanzen zu weiteren Dörfern oder auch städtischen Kraftwerken. Für grössere Distanzen besteht zwischen der Mittelspannungsebene und der Höchstspannungsebene die Hochspannungsebene, welche meist mit 110 kV Strom liefert. Durch die über 250'000 Kilometer Leitungen in der Schweiz wird der Strom um das 1000-fache reduziert, um als handelsübliche Energie seinen Nutzen zu erfüllen. Für diese Transformation dienen die Netzebenen 2, 4 und 6. Die Netzebenen 1, 3 und 5 fungieren somit als

Übertragungsleitungen und transportieren den Strom über Hoch- und Mittelspannungsleitungen.⁷

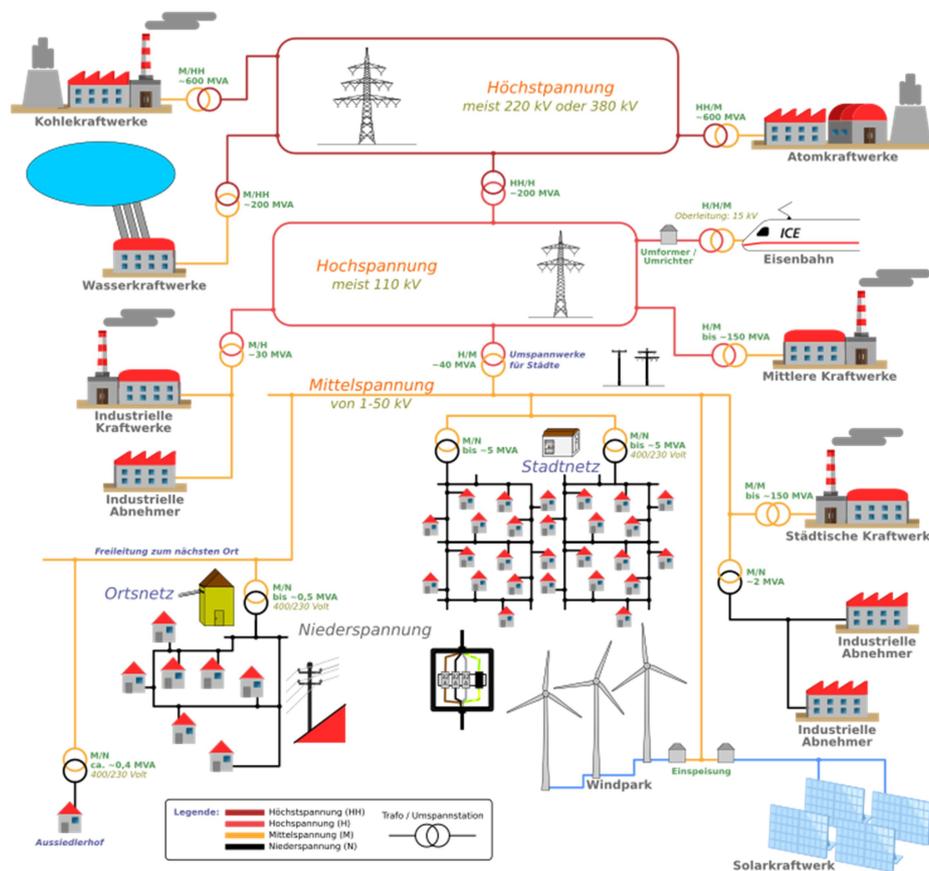


Abb. 1. Struktur eines Stromnetzes

Auf diesen Ebenen baut das Stromnetz der Schweiz auf. Die Vernetzung findet im Bereich Höchstspannung überirdisch, bei kleineren Spannungen unterirdisch statt.

Unter der Netzstabilität versteht man das Gleichgewicht zwischen Produktion und Verbrauch. Diese Stabilität wird benötigt, um in der Schweiz die Standardfrequenz, welche bei 50 Hertz liegt, zu garantieren. Wird diese Frequenz durch Wegfallen von Verbraucher oder Produzent verändert, so können wichtige Generatoren bzw. Transformatoren Schaden nehmen. Wenn somit der Verbrauch kleiner als die Produktion ist, nimmt die Frequenz zu. Umgekehrt sinkt die Frequenz durch zu hohen Verbrauch, da die elektrischen Generatoren schwerer drehen müssen.

Abweichungen dieser Frequenz werden mithilfe der Netzzeit gemessen. In Europa basiert die Netzzeit auf der Standardnetzfrequenz von 50 Hz. Somit entspricht eine Sekunde der

⁷ Swissgrid (2019). Stromnetz, Netzebenen

Netzzeit in Europa 50 Schwingungen des Wechselstroms. Durch Abweichungen der Standardfrequenz entstehen leichte Abweichungen. Diese Netzzeitabweichung wird mithilfe der Weltzeit errechnet, sie dient der Korrektur der Frequenz im Netz.⁸

Woher kommen die 50 Hertz?

Zu Beginn lag die Frequenz nicht bei einem festen Wert. Der erste Wechselstromgenerator, der in den USA gebaut wurde, produzierte - aus heutigen Verhältnissen betrachtet - mit der Frequenz von $133 \frac{1}{3}$ Hz. Bei der damaligen Konkurrenzfirma lag die Frequenz bei 125 Hz, was 15'000 Polwechsel entsprach. Diese hohen Frequenzen waren für das leichte Gewicht der Transformatoren von Vorteil. Doch mit der Zeit wurde klar, dass tiefe Frequenzen für den Bau von drehenden Elektromaschinen für Umformung und Motoren optimaler sind. Hierzu wurde eine kleine Anzahl von Polen verwendet, und Kraftstrom mit niedriger Wechselzahl wurde zur Norm. Durch den Umschwung zur direkten Kupplung mit Wasserturbinen wurden diese niedrigen Drehzahlen nochmal verstärkt.⁹

Durch den Lichtstrom musste der Strom mehr als 5000mal in der Minute wechseln, um das Lichtzucken zu verhindern. Durch diese Umstände wurde die Frequenz auf $41 \frac{2}{3}$ bzw. 42 Hz gesetzt. Diese Feststellung war auch in den USA klar geworden und man senkte die Frequenz. Somit entstand eine breite Anzahl von Gebrauchswerten. Als Kompromiss wurde eine Frequenz von 60 Zyklen in der Sekunde als Normwert festgelegt. Durch die Niagara-Kraftwerke jedoch blieb in dieser Region die Standardfrequenz bei 25 Hz.

Auch in Europa war die Standardfrequenz von Anfang an zwischen 40 und 70 Hz festgelegt. Durch die zwei Elektrofirmen Oerlikon MFO und AEG, welche eng zusammenarbeiteten und die Hochspannungs- und Drehstromübertragung einführten, wurde die Frequenz von 40 Hz, selten auch 25 Hz, stark benutzt. Die MFO führte bei Versuchen für die Leistungsoptimierung 187,5 Umdrehungen in der Minute ein, welche demzufolge einen Strom mit 50 Hz produzierten. Von nun an wurden die 50 Hz bei neuen Anlagen übernommen.¹⁰

⁸ Swissgrid (2019). Frequenz

⁹ Energietechnische Gesellschaft(2014). Warum haben wir heute die Frequenz 50 Hz?

¹⁰ Energietechnische Gesellschaft(2014). Warum haben wir heute die Frequenz 50 Hz?

Import/Export

Für den Ausgleich der Energiebedürfnisse muss die Schweiz Strom vom Ausland importieren bzw. exportieren. Dazu wird mit dem „Wide Area Monitoring“ gearbeitet. Hier werden die Netzfrequenzen von Standorten in Europa zusammengetragen und öffentlich zugänglich gemacht. Die Daten werden bei Swissgrid zusammengelegt und publiziert. Um die Frequenz stabil zu halten, wird bei Energieüberschuss mit Deutschland, Frankreich, Italien und Österreich Strommarkt betrieben. Dies bedeutet, dass jederzeit ein Austausch von Elektrizität unter den Ländern stattfindet.¹¹

Schweiz Stromproduzenten

Im Vergleich zum angrenzenden Ausland kommen 55,4% der Elektrizität in der Schweiz aus Wasserkraft. Die Kernkraft liegt mit 36,1% auf Platz zwei. Unter Einbezug der restlichen Kraftwerke errechnet sich ein Produktionstotal von 67'558 GWh.

Elektrizitätserzeugung 2018	zu Vorjahr	Produktion GWh	Anteil
Wasserkraft	+2.1%	37'428	55.4%
Kernkraftwerke	+25.2%	24'414	36.1%
Thermische Kraftwerke	+5.5%	3'008	4.5%
Photovoltaikanlagen	+15.5%	1'944	2.9%
Bio-, Klär- und Deponiegas	+5.7%	352	0.5%
Holz- und Spezialfeuerungen	-9.9%	290	0.4%
Windanlagen	-8.3%	122	0.2%
Total	(+9.9%)	67'558	100%

Abb. 2. Elektrizitätserzeugung 2018

¹¹ Swissgrid (2019). Strommarkt

Wasserkraft

Als wichtigste einheimische Energiequelle der Schweiz gilt die Wasserkraft. Sie deckt rund 96% der erneuerbaren Stromproduktion in der Schweiz ab. Durch den Standortvorteil der Schweiz kann das vorhandene Gefälle effizient genutzt werden. Hierbei wird durch eine Stauanlage die sich im Wasser befindende potentielle Energie zurückgehalten. Das abfließende Wasser wird durch eine Turbine geführt, welche mit einem Getriebe oder einem elektrischen Generator verbunden ist. Somit entsteht aus der mechanischen Energie elektrische Energie. Allgemein gibt es zwei Wasserkraftwerkstypen. Beim Laufwasserkraftwerk wird das Wasser nicht gespeichert, sondern die Laufkraft abgenommen. Somit entspricht der Zufluss immer dem Abfluss. Neben diesen gibt es die Speicherkraftwerke. Sie besitzen einen Energiespeicher, der meist als Stausee gebildet wird. Die Produktion lässt sich hierbei leicht an die Anforderungen anpassen, indem die benötigte Energie in Form von Wasser abgelassen wird. Zusätzlich ist ein Speicherkraftwerk zu nahezu jeder Zeit in der Lage, schnell und effizient Energie zu liefern. In der Schweiz werden jedoch nur Kraftwerke miteinberechnet, welche mindestens ein Viertel der Winterproduktion decken können. Restliche Wasserkraft wird von Laufkraftwerken bezogen.¹²

Atomkraft

In der Schweiz gibt es aktuell insgesamt fünf Kernreaktoren. Zur Zeit wird aus Sicherheitsgründen und der Endlager-Problematik der Betrieb dieser jedoch stark debattiert. Nach der Katastrophe in Fukushima wurde auch der Vorschlag von einem Neubau abgelehnt. Dieser hätte eine Stromlücke verhindern sollen, die durch die Stilllegung der Kraftwerke Beznau und Mühleberg entstehen würde. Bei der Kernspaltung werden die radioaktiven Elemente, welche verwendet werden, mit Neutronen beschossen. Das Neutron wird vom Atomkern absorbiert und spaltet sich in leichtere Kerne auf. Hierbei werden Neutronen und Energie in Form von Strahlung freigesetzt, und es entsteht eine kontrollierte Kettenreaktion. Diese Strahlung wird verwendet, um das angrenzende Wasser zu erwärmen und es entsteht Dampf. Dieser Dampf wird in einer Turbine, welche an einem Generator angeschlossen ist, zu Strom verwandelt.¹³

¹² Schweizerischer Wasserwirtschaftsverbund (2019).

¹³ Kernkraftwerk Leibstadt(2019). So funktioniert ein Kernkraftwerk.

Energiepolitik Schweiz

Das Ziel der Schweizer Energiepolitik ist es, eine ausreichende, sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung und einen sparsamen und effizienten Energieverbrauch sicherzustellen.¹⁴ Um dieses Ziel zu verfolgen wurde 1930 durch auftretende Energieprobleme das Eidgenössische Amt für Elektrizitätswirtschaft geschaffen. 1963 entschied sich der Bundesrat für die Kernkraft und die Einteilung des Energiemix in 40% Kernenergie, da ein rationales System der gegenseitigen Ergänzung von Wasser und Atomenergie optimal wäre. Zur Festlegung der Ziele der Energiepolitik wurde vom Bund die Eidgenössische Kommission für die Gesamtenergiekonzeption eingesetzt. Die GEK erarbeitete somit einen Bundesverfassungsartikel für das Energiesparen, die Energieforschung und die Vorsorge als Ziele. In den 90er Jahren wurde der Umschwung zu erneuerbaren Energien schnell aktuell und man versuchte die CO₂ Emissionen zu senken. 1999 traten folglich das Energiegesetz und die Energieverordnung in Kraft. Darin wird die Förderung der einheimischen und erneuerbaren Energien beschrieben zum Zweck der sparsamen Energienutzung. In der Zukunft will die schweizerische Energiepolitik vier Punkte verfolgen. Diese sind die Versorgungssicherheit aus dem Inland, die Umweltverträglichkeit, die Wirtschaftsverträglichkeit und die Sozialverträglichkeit. Für diese Ziele müssen die derzeitigen wichtigsten Energieträger Uran, Erdöl und Erdgas vermindert beziehungsweise abgeschafft werden. Durch die Abschaffung dieser Energieträger würde jedoch ein Energieproblem entstehen, insofern es nicht genügend Alternativenergien zu Verfügung hätte. Konzepte der Kernfusion, Geothermie und Wasserstoffbrennzelle ergeben hier Hoffnung auf neue Energiegewinnung.¹⁵

Strom in der Schweiz

Um 1970 stammte 90% der schweizer Stromproduktion aus Wasserkraft. Nach Inbetriebnahme der Atomkraftwerke sank dieser Anteil auf 60%, blieb jedoch die wichtigste Quelle von erneuerbarer Energie.¹⁶

Die Zahl der Stromausfälle in der Schweiz ist in den letzten Jahren drastisch gestiegen.¹⁷ Dabei waren nicht wie vermutet kleinere Teile von Dörfern, sondern auch mehrere

¹⁴ Eidgenössisches Departement UVEK(2019).Grundsätze der Energiepolitik

¹⁵ Helmut Stalder (2019). Die Schweiz steuert auf einen Strommangel zu.

¹⁶ Schweizerischer Wasserwirtschaftsverbund (2019).

Gemeinden bis hin zu Stadtteilen betroffen. Das Risiko einer Strommangellage ist derzeit die grösste Gefährdung in der Schweiz. Hierbei liegt der Schwerpunkt bei der Unterversorgung von 30% der Verbraucher in den Wintermonaten, denn zu dieser Jahreszeit kann nicht genügend Strom produziert beziehungsweise importiert werden. Ein Strommangel in solch grosser Dimension wurde im Winter 2015/2016 das erste Mal klar ersichtlich. Durch den überdurchschnittlich trockenen Sommer führten die Flüsse weniger Wasser, was zur Verringerung der Laufwasserkraft führte. Zusätzlich verzögerte sich die Wiederinbetriebnahme des Kernkraftwerks Beznau und somit fehlten der Nordschweiz 720 MW.¹⁸

Blackout/Stromausfall

Die Verteilung der Stromflüsse wird normalerweise immer im Voraus von Netzgesellschaften geplant, um die Stromverteilung und Produktion zu optimieren. Durch unvorhersehbare Stromflusswechsel kann diese Verteilung jedoch instabil werden und zusammenbrechen. Denn das Problem liegt darin, dass elektrischer Strom praktisch zur identischen Zeit zum Verbrauch produziert werden muss. Durch ein plötzlich auftretendes grosses Ungleichgewicht, also eines Lastwegfalls oder einer Überbelastung, kann die Frequenz eine zu hohe Abweichung vom Standardwert 50 Hertz einnehmen. Bei einer derart schnellen Änderung kann die Drehzahl nicht genug schnell angepasst werden. Wobei bei einem Überschuss sogenannte „Dummy-Lasten“ zugeschaltet werden, so muss bei einer Überlast ein Teil der Verbraucher vom Netz abgekoppelt werden, um fatale Schäden an den Generatoren zu verhindern. Im Falle eines Kraftwerksausfalles bzw. der zu niedrigen Frequenz eines Kraftwerkes muss das Kraftwerk vom Netz getrennt werden. Ansonsten versuchen die Nachbarkraftwerke diesen Engpass auszufüllen und es entsteht eine Kettenreaktion, welche zum Blackout führt. Wenn es dennoch zum Stromausfall kommt wird in drei zeitlich geordnete Kategorien unterteilt. Der Ausdruck „Netzwischer“ wird dabei für kurzzeitige Ausfälle von wenigen Sekundenbruchteilen verwendet. In diesem Falle wird die Energieversorgung automatisch wiederhergestellt, da die Ursachen auf der Verbraucherebene stattfinden. Beispiele hierfür sind Blitzeinschläge, Lichtbogenfehler etc. Bei einem kurzzeitigen Spannungseinbruch, welcher meist infolge von Überlastung eintritt,

¹⁷ Top online (2019). Schweiz entging knapp einem Blackout

¹⁸ Swissgrid (2016). Bericht Winter 2015/2016.

auch „Brownout“ genannt, können dagegen schon leichte Schäden bei Haushaltsgeräten entstehen, falls sie nicht über einen Batteriespeicher verfügen. Sie sind zusätzlich auch Vorbote für die dritte Kategorie, den Totalausfall, auch Blackout genannt. Dieser Ausfall kann vom Minutenbereich bis in den Bereich mehrerer Stunden dauern. Hierbei entstehen weit grössere Schäden.¹⁹

Folgen eines Totalausfalls, auch Blackout

Für den Fall eines Ausfalls sind die Netzanschlüsse auf individuelle lokal getrennte Umspannwerke geschaltet, um die Versorgung trotz Ausfall auf anderen Umspannnetzen weiterhin zu garantieren. Wenn dennoch ein Totalausfall stattfindet, kann dieser unangenehme Folgen mit sich ziehen. Im Haushalt sind diese Schäden noch vertretbar. Jedoch sind viele Dinge, von denen die Bevölkerung gar nicht denkt, dass sie davon abhängig sind, auf dem Stromnetz basierend. Bei einem Blackout ist es nicht mehr möglich, die Mobilität zu gewähren, denn Ampeln, Signale und allgemeine Beleuchtung fallen aus. Auch der öffentliche Verkehr sowie Aufzüge versagen. Zusätzlich setzen Heizung und Lüftung, Elektroheizungen, Öl- und Gas-Zentralheizungen aus. Beispielsweise werden auch Elektroherd, Mikrowelle, Wasserkocher etc. nicht mehr funktionieren. Eine grosse Problematik besteht im Zusammenhang mit der Aufbewahrung von Lebensmitteln. Es wird nicht mehr möglich, Nahrungsmittel zu kühlen, sie tauen auf und verderben in Kürze. Zusätzlich entfällt die gesamte Kommunikation. Mobiltelefone, Festnetz, Rundfunk und Fernsehen sind nur eingeschränkt oder gar nicht mehr verwendbar. Dazu kommt, dass die Menschen in Supermärkten ohne funktionsfähige Kassen nicht mehr bezahlen können. Auch aus den Automaten ist kein Geldbezug möglich. Tankstellen, die mithilfe elektrischer Pumpen Treibstoff aus unterirdischen Tanks ziehen, verlieren ihren Nutzen. Selbst die Trinkwasseraufbereitung sowie die Abwasserentsorgung fallen nach einigen Tagen aus. Nicht zu vergessen sind die massiven Folgen der Sicherheit, denn Sicherungssysteme, Alarmanlagen, Feuermelder und viele weitere Geräte zur Gewährleistung der Sicherheit sind nicht mehr aktiv. Ein Zusammenbruch der Infrastruktur und damit einer funktionierenden Gesellschaft eines Landes kann bei einem grossflächigen Blackout, der nicht behoben werden kann, somit kaum verhindert werden. Selbstverständlich werden für die Verhinderung der Folgen eines Blackouts Vorkehrungen getroffen. Hierzu sind viele

¹⁹ Richard Graf, Rainer Lietzow (2018). Netzwiederaufbau nach einer Grossstörung.

lebensnotwendigen Dienste mit Notstromgeneratoren ausgestattet. Sie dienen zur Überbrückung des Unterbruchs durch Notstrombetrieb. Die Kosten für einen Stromausfall fallen, selbst wenn er von kurzer Dauer ist, in immenser Höhe aus.²⁰

“In Studien wird die Schadenshöhe eines Blackouts mit mindestens 6.50 Euro je Kilowattstunde angegeben. Wir verbrauchen etwa 1.6 Milliarden Kilowattstunden am Tag.“ (Philipp Rösler, 2011, Seite 29).

Dabei wird aber von hypothetischen Zahlen ausgegangen, da kaum abschätzbar ist, auf welche Höhe sich die Schäden summieren. Ausserdem sind in der Geldmenge Ausfallkosten von Kühlsystemen nicht miteinberechnet.

Restart

Bei einer gesamten Übertragungsnetzstörung wird bei Swissgrid die „Grossstörung Schweiz“ ausgerufen. Dadurch werden alle Verteilnetzbetreiber in der Nähe informiert und es wird ein Störungsmanager einberufen. In der Folge wird ein definierter Ausgangsschaltzugang erstellt. Das Schweizer Stromnetz wird dabei vom Ausland getrennt und in mehrere unabhängige Teile eingeteilt.

Nur wenige bestimmte Kraftwerke sind in der Lage, sich selbst hochzufahren. Dies wird benötigt, um andere Kraftwerke zu starten, welche diese Fähigkeit nicht besitzen. Dieses Phänomen wird Schwarzstart genannt, da die Kraftwerke auf keine externe Energie angewiesen sind. Solche Kraftwerke müssen ein flexibles und schnelles Startverhalten garantieren und heftige Anlaufströme bewältigen können. Hierfür sind meist Wasserkraftwerke oder auch Pumpspeicher oder Gaskraftwerke mit einem Batteriespeicher geeignet. Diese sollten optimalerweise in der Nähe von Grosskraftwerken stehen, weshalb viele thermische Kraftwerke eigene schwarzstartfähige Turbinen besitzen. Atom-, Blockheiz oder Braunkohlekraftwerke sind ohne externe Energie nicht in der Lage, autonom zu starten. Diesen Startstrom müssen sie von Schwarzstartern mithilfe der Impulsproduktion beziehen, denn sie benötigen enorm viel Energie, um ihre Stromproduktion neu hochzufahren. Um die Kommunikation zwischen den Netzbetrieben zu erhalten, dienen netzunabhängige Notstromgeneratoren der Sicherstellung. Um nun den Betrieb wiederaufnehmen zu können,

²⁰ IB-Haertling (2019). Was ist ein Powerblackout.

wird das schwarzstartfähige Kraftwerk hochgefahren. Bis das Kraftwerk Energie abgeben kann befindet es sich in einer Haltephase. Sobald es sich mit dem Stromnetz synchronisiert hat, startet die Einspeisung. Die die Stromverbraucher werden einzeln zugeschaltet, um die Frequenz nicht einbrechen zu lassen. Zur Unterstützung wird von benachbarten Stromnetzen Wirk- und Blindlast bezogen, um die Netzstabilität zu garantieren. Somit wird der Netzbetrieb mittels Inselbetrieb wiederaufgebaut, falls noch keine laufenden Kraftwerke aus dem Ausland bei der Energielieferung miteinbezogen sind. Um den Stromfluss sicherzustellen, werden auch Transformatoren eingesetzt. Der Eigenbedarf im Unterwerk wird somit wieder versorgt und Notstromaggregate können entkoppelt werden. Sobald die Lastzuschaltung bestätigt wird, werden die angeforderten Lasten ans Netz angehängt, ohne dass die Frequenz in sich zusammenbricht.²¹

Strommarkt

Wie auch auf dem normalen Markt gilt im Bereich Strommarkt, dass der Preis durch Angebot und Nachfrage bestimmt wird. Der grosse Unterschied bei Strom ist dagegen, dass er kaum speicherfähig und leistungsgebunden ist. Hiermit ist klar, dass der Strom nahezu zur selben Zeit produziert sowie verbraucht werden muss, weshalb der Strompreis nie genau gleich bleibt. Bei grossem Angebot liegt die Nachfrage tief und mit ihr auch der Preis. Umgekehrt sind die Preise mit grosser Nachfrage bei kleinem Angebot hoch. Durch tägliche normale Umwelteinflüsse kann das Angebot schnell variieren. Auf dem Strommarkt gibt es natürlich auch verschiedene Handelsprodukte, die auf unterschiedliche Zeiten in die Zukunft gehandelt werden. Dies dient dazu, dass die Käufer gegen das Risiko eines plötzlichen starken Preisanstiegs geschützt sind. Für die Verkäufer dient ein Preisaufschlag als zusätzlicher Erlös.

Für den kurzfristigen Spotmarkt gibt es zwei Märkte unterschiedlicher Zeitspanne. Beim Day-Ahead wird der Strom für den nächstfolgenden Tag gehandelt. Hierbei liegt die Dead-line bei 12 Uhr am vorhergehenden Tag. Die Börse errechnet mit den Kauf- und Verkaufsgeboten den jeweiligen Stundenpreis des nächsten Tages, den sogenannten Grosshandelspreis. Vergleichbar ist dieser mit dem Tagesschlusskurs einer Aktie. Beim Intraday Handel kann der Handel der Strommenge am jeweiligen Tag bis 30 Minuten vor dem Transfer gehandelt

²¹ Richard Graf, Rainer Lietzow (2018). Netzwiederaufbau nach einer Grossstörung.

werden. Neben der Börse gibt es auch noch den sogenannten „Over the Counter“ Handel.²² Hierbei wird direkt zwischen zwei Handelspartnern transferiert. In diesem Falle gibt es wie an der Börse den Terminhandel, aber auch Spothandel. Die Frist des Handels liegt hier jedoch bei 15 Minuten.

Um den Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage konstant zu garantieren, werden ausreichend Erzeuger beziehungsweise flexible Verbraucher am Markt teilnehmen. Durch die Preissignale werden von den Marktakteuren neue Investitionen in Erzeugung und Verbrauch gesteckt. Für die Entscheidungen der Investitionen werden Prognosen und die Preise im Terminmarkt verwendet. Um den Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch gleich zu halten, gibt es Bilanzkreise. Durch dieses System werden die Akteure verpflichtet, mithilfe von Prognosen Fahrpläne aufzustellen und bekannt zu geben. In diesem Bilanzkreissystem ist jeder Verbraucher und Erzeuger erfasst. Dieses System ist vergleichbar mit einem Mengenkonto für Energie, welches von dem Bilanzkreisverantwortlichen, dem „Buchhalter“, geführt wird. Er ist für die korrekte Erfassung der Zu- und Abgänge zuständig und sorgt dafür, dass keine Energie auf dem virtuellen Konto verbleibt.

Dennoch kommt es zwischendurch zu Abweichungen des Verbrauchs und der Energie. In diesem Fall liegt es an den Übertragungsnetzbetreiber, diese Differenz auszugleichen. Hierfür werden verschiedene Arten von Regelleistungen beschaffen. Es wird die benötigte Leistung zur Systemsicherheit berechnet und diese über Ausschreibungen am Regelleistungsmarkt erworben. Die Primärregelleistung muss hierbei innert 30 Sekunden bereitgestellt werden, die Sekundärregelleistung in 5 Minuten und die Minutenreserve unter 15 Minuten. Zudem wird in positive und negative Regelleistung unterschieden. Erstere wird durch Sinken des Verbrauches bzw. Steigen der Produktion erbracht. Durch steigender Verbrauch und sinken der Produktion wird somit die negative Regelleistung ausgeführt. Die Kosten für diese Leistungen werden dem Bilanzkreis berechnet, der vom Fahrplan abgewichen ist. Somit gleicht die Benutzung von Regelleistung die Unterschiede zwischen den Fahrplänen und der Energie, welche geliefert beziehungsweise bezogen wird, aus. Die Ausgleichskosten wirken somit als Strafzahlung für Ungenauigkeiten des Fahrplans.²³

²² Smard (2019). So funktioniert der Strommarkt.

²³ Smard (2019). So funktioniert der Strommarkt.

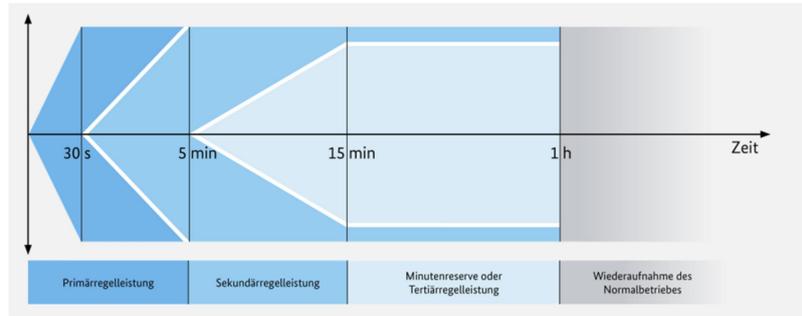


Abb. 3. Zeitliche Verfügbarkeit von Regelleistung

Zur Bestimmung, welche Anlage Vorrang bei der Stromproduktion hat, dient die sogenannte Merit Order. Nach dieser Ordnung werden die Kraftwerke nach ihren Angebotspreisen aufgereiht. Die besten Angebote liegen bei den Wasserkraftwerken, Windanlagen etc.

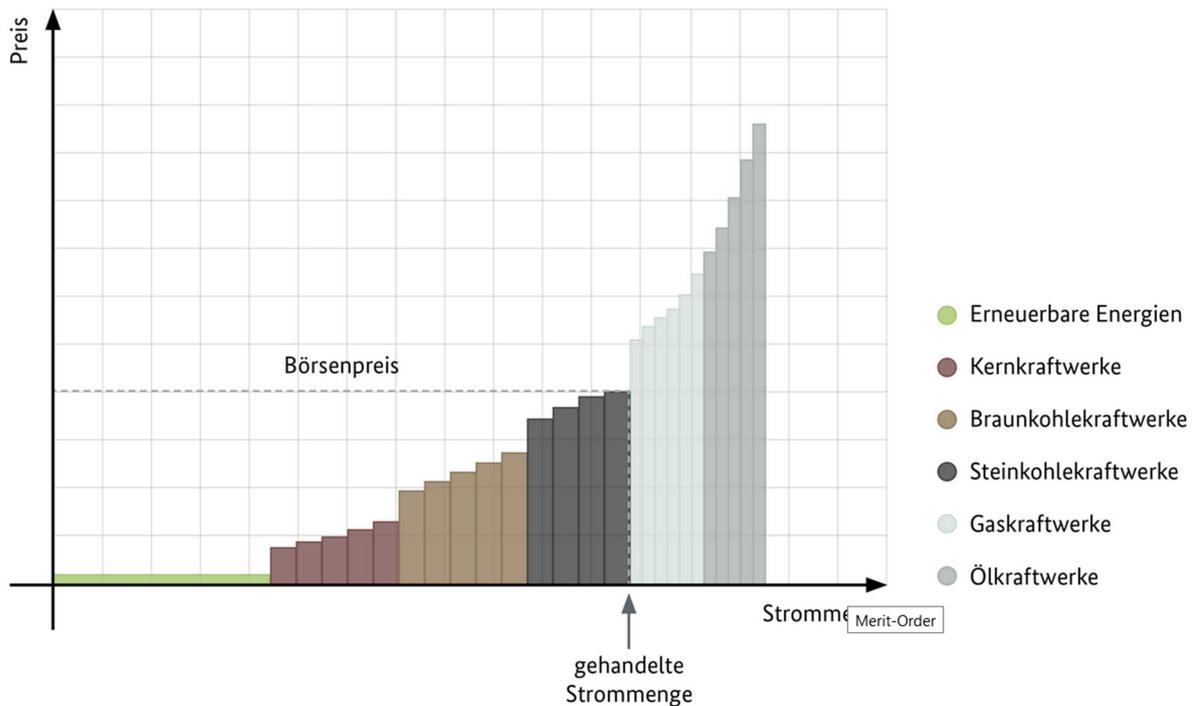


Abb.4 Strommenge Deutschland

In der Grafik wird sichtbar, wie der Preis bei hohem Bedarf mit den konventionellen Kraftwerken steigt, da die Grenzkosten dieser erhöht sind. Der Preis steht somit erst fest, wenn der Strombedarf der Verbraucher gedeckt ist. Er wird durch das Kraftwerk mit den höchsten Grenzkosten, welches noch zur Stromproduktion verwendet wird, bestimmt. Der Vorteil für die anderen Anlagen besteht darin, dass sie mit dem gleichen Preis bezahlt werden und eine grössere Rendite haben. Für den Käufer hat dies nicht grosse

Auswirkungen, denn Strom ist ein homogenes Gut. Somit bleibt die Qualität immer gleich und das Stromnetz in ganz Europa nahezu synchron. Dieser Handel wird jedoch nur für Länder, die Mitglieder der EU sind, ermöglicht.²⁴

Material und Methoden

Für meine Arbeit hatte ich vor, ein Programm zu entwickeln, welches eine Benutzeroberfläche hat, auf der der Nutzer aktiv die Produzenten und die Verbraucher verstellen kann. Als Oberfläche war eine Europakarte geplant, auf welcher verschiedene Kraftwerksinseln zu sehen und zu steuern sind. Eine Insel besteht aus Kraftwerk, also dem Produzent des Stroms und dem Verbraucher. Einzeln sollte es möglich sein, Produzent oder Verbraucher vom Netz zu trennen um ersichtlich zu machen, welche Konsequenzen dies für die anderen Kraftwerke hat.

Delphi

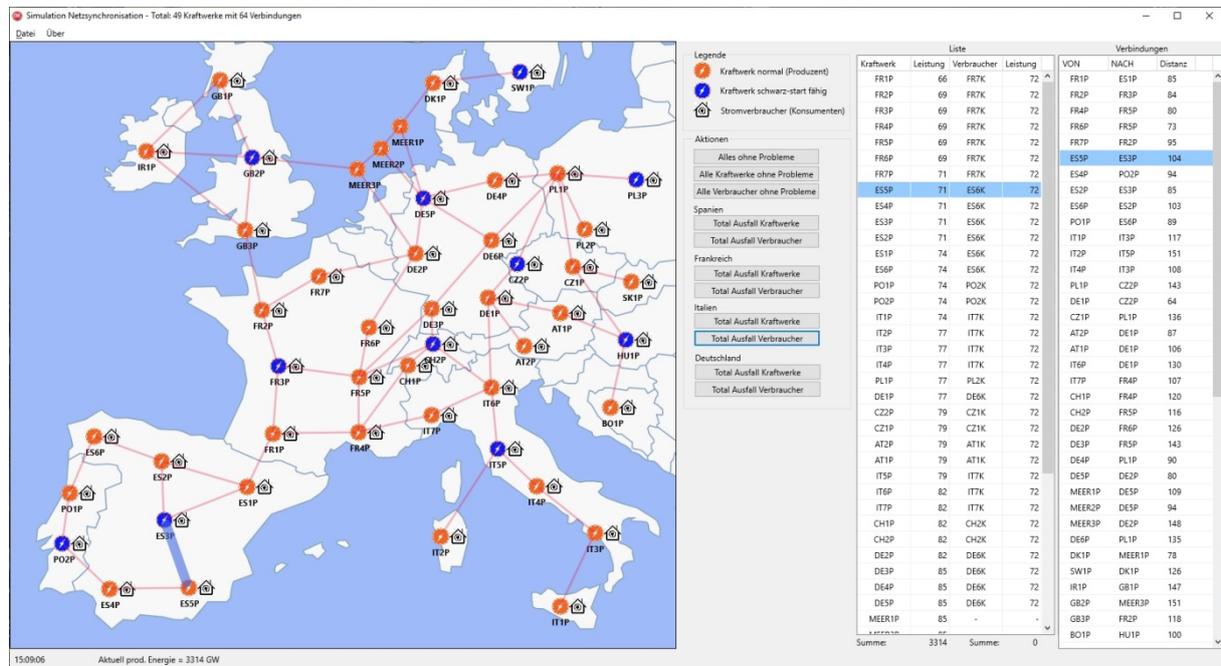
Delphi ist eine moderne, komplett objektorientierte Programmiersprache. Die Merkmale von Delphi bestehen aus:

- Möglichkeit der systemnahen Programmierung wie bei C.
- Aus gleichem Code kann sowohl Windows, Linux, Mac, Android und IOS- Apps erzeugt werden.
- Sehr schneller und sehr schlanker Code.
- Keine Laufzeitenbibliothek notwendig (nur eine Exe-Datei).
- Keine Interpreten notwendig.

Auf der Europakarte sollten nun kleine Kraftwerksinseln entstehen, mit jeweils einem Produzenten und einem Verbraucher. Der Produzent repräsentiert eines oder mehrere zusammengehörende Kraftwerke und ein Verbraucher repräsentiert z.B. eine grosse Stadt bzw. alle an diesen Produzenten angeschlossenen Verbraucher. Die Idee war, dass Verbraucher und Produzenten mit der Maus ein und ausgeschaltet werden können, um einen Ausfall zu simulieren. Während des Aufbaus der Benutzeroberfläche, als noch kein

²⁴ Smard (2019). So funktioniert der Strommarkt.

Programmcode vorhanden war, bemerkte ich, dass der Programmcode für die Nutzeroberfläche immens gross wäre, und daher für diese Maturaarbeit ausserhalb des mir Erreichbaren. Zusätzlich liegt der Fokus dieser Maturaarbeit nicht auf einer Benutzeroberfläche, sondern auf dem Ausgleich der Netzschwankungen. Zudem empfahl mir meine Betreuungsperson die Verwendung von Octave bzw. Matlab.



Bildschirmausschnitt der geplanten Delphianwendung

Excel

Somit musste ich eine effizientere Lösung suchen, um das Problem abzubilden. Also ein Programm, bei dem ich die Erkenntnisse aus der Delphi-Vorarbeit übernehmen konnte. Diese Erkenntnisse waren:

- Kraftwerke und Verbraucher können zusammengefasst zum Kraftwerk werden (Vereinfachung).
- Diese Kraftwerke kann man in einer Matrix zusammenfassen.
- Ausfall eines Kraftwerks muss nicht berücksichtigt werden, da es in diesem Fall sowieso vom Netzverbund zwangsentkoppelt wird.
- Es reicht somit eine Matrix zu betrachten, in der die einzelnen Zellen eine aktuelle Frequenz eines Kraftwerks aufzeigt.
- Wie beeinflusst eine Zelle (Frequenz) die Nachbarzellen?

- Triviale Annahme: Jede Zelle wird durch die Nachbarzellen beeinflusst(Zu- oder Abfluss zur Zelle).
- Die Realisierung erfolgt sinnvollerweise durch eine Mittelwertbildung aller Nachbarzellen mit der betrachteten Zelle.

Die Wahl auf Excel fiel durch die einfache Möglichkeit, Zellen auf Grund des Zellenwertes einzufärben und weil eine Matrix vereinfacht wie eine Tabelle aufgebaut ist (Zeilen und Spalten).

Der Nachteil von Excel im Vergleich zu Octave ist die Geschwindigkeit und die etwas umständliche Programmiersprache (VBA=Visual Basic for Application). Der Programmaufbau in Excel entspricht jenen von Octave.

GNU Octave

Im Ingenieurwesen wird zum Lösen numerischer Probleme oft die kommerzielle Software Matlab verwendet. Diese Software dient im Gegensatz zu Computeralgebrasystemen nicht der symbolischen, sondern der numerischen Lösung mathematischer Probleme. Hierbei wird die Lösung als Zahlenwert dargestellt, nicht als Formel. Dies findet seine typische Anwendung beim Rechnen mit Matrizen, wodurch auch der Name zusammengesetzt ist: MATrix LABoratory. Viele Probleme der Ingenieurwissenschaften lassen sich in Matrizenform darstellen und so lösen (z.B. Finite Element Methode = Berechnen von z.B. Festigkeit von Autokarosserien, Strömungsprobleme etc.).

In dieser Software können kleinere Programme als Skripte oder Funktionen in geschlossene Einheiten verpackt werden, um sogenannte „Werkzeugboxen“ (Bibliotheken bzw. Libraries) zu kreieren. Solche Dateipakete sind auch kommerziell erhältlich.

Eine Matlab-Lizenz ist sehr teuer. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des GNU-Projekts eine freie Version programmiert. Das GNU-Projekt verfolgt das Ziel, ein offenes, unixähnliches Betriebssystem zu schaffen, um über Software kostenlos zu verfügen. Diese freie Version von Matlab heisst GNU-Octave. Die Skriptsprache von GNU Octave ist nahezu die gleiche wie bei Matlab, es bestehen nur sehr geringe Unterschiede. Somit ist der Programmcode zwischen den beiden Softwares nahezu kompatibel.

Octave funktioniert vereinfacht wie ein Taschenrechner, in welchen man Formeln eintippen kann. Jeder Berechnungsschritt kann dabei als Datei gespeichert und in einem weiteren Programm verwendet werden. Somit werden Programmschritte einfach zusammengefasst und ein komplexes Programm entsteht.

Um in Octave zu beginnen, geht man in das Command Window. Hier wird das Command Prompt, also die Eingabezeile mit >> angezeigt. Jetzt können Berechnungen eingegeben und berechnet werden.

```
>(393+607)/10  
ans = 100
```

So kann Octave als einfacher Taschenrechner benutzt werden. In der unteren Zeile wird durch „ans“ (Englisch für Answer) die Antwort ausgegeben.

Nun wird der Variable „x“ der Wert 5 zugeteilt. Dieser Wert wird in der Variable x gespeichert, solange bis er durch eine neue Eingabe überschrieben wird. Als neue Eingabe berechnen wir nun den Sinuswert von x.

```
>>x=5  
x = 5  
>>sin(x)  
ans = -0.95892  
>>
```

Der wichtigste Datentyp in Octave ist die Matrix. Matrizen können Variablen zugeteilt werden. Hierzu wird die Matrix A von links oben nach rechts unten definiert.

```
>>A=[1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]  
A =  
    1 2 3  
    4 5 6  
    7 8 9
```

Einzelne Programme können mit Hilfe von „function“ definiert werden und als Dateien abgespeichert werden. Dazu werden die Anweisungen im Editor geschrieben und durch eine Funktionsklammer geschlossen.

```
function f = Erstelle_Matrix
    A=[1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]
endfunction
```

Für das Programm, welches ich für die Maturaarbeit entwickelt habe, habe ich zwei Hauptdateien geschrieben, welche im Anhang nachgesehen werden können.

Um das Stromnetz als viele verschiedene Inseln darzustellen, kreierte ich zu allererst eine Matrix.

```
function B =
    Create_Matrix(minFrequenz,maxFrequenz,anzSpalten,anzZeilen)
    B = randomArray = minFrequenz + (maxFrequenz - minFrequenz)
        * rand(anzSpalten,anzZeilen);
endfunction
```

Die Matrix wird durch die Anzahl Spalten und die Anzahl Zeilen in ihrer Grösse definiert. Die Werte, welche eingefügt werden, werden zufällig zwischen der maximalen und der minimalen Frequenz ausgewählt. Somit entsteht eine Matrix mit randomisierten Werten zwischen der „minFrequenz“ und der „maxFrequenz“.

Mit dieser Matrix stand das Grundgerüst für das Programm in Octave. Nun wird die kreierte Matrix als Funktion übernommen. Die Idee bestand darin, zu jeder Stelle in der Matrix eine kleine drei mal drei Matrix zu definieren, um die umliegenden Felder als Variabel zu deklarieren. Hierzu wurde von der aktuellen Zelle, die gerade angeschaut wird, ausgegangen, und darum durch `links`, `rechts`, `oben`, `unten`, `linksunten`, `linksoben`, `rechtsunten` und `rechts oben` die umliegenden Zellen definiert. Diese Felder werden zu Anfang als 0 definiert, um bei jedem Durchlauf die neuen Zahlen zuordnen zu können. Für die aktuelle Zelle wird der Wert der Matrix aus der bestimmten Zelle bzw. Spalte geholt.

```
Aktuelle_Zelle = B(spalte,zeile);
```

Um nun der aktuellen Zelle die richtigen angrenzenden Werten zu zuteilen, wird von der aktuellen Zelle ausgegangen und für Beispielsweise linksunten von der aktuellen Zelle eine Spalte subtrahiert und eine Zeile addiert.

```
linksunten = B(zeile+1,spalte-1);
```

Da diese Matrix auch Randfelder hat, bei welchen nicht alle anliegenden Werte definiert sind, muss für jedes Feld, welches eine andere Anordnung der umliegenden Zellen hat, ein eigenes If-Kontrollsystem bezeichnet werden. Hierbei gibt es neun verschiedene Typen. Der einfachste Typ ist eine Zelle in der Mitte, welche alle umliegenden Werte definiert hat. Die weiteren Typen bestehen aus den Randzellen oben, rechts, unten und links, welche fünf angrenzende Zellen haben und jeweils die vier Eckzellen, welche nur an drei Zellen angrenzen. Für jede dieser Zelltypen steht somit eine eigene If-Kontrollstruktur, sodass das Programm jede Möglichkeit durchgeht, und den richtigen Zellentyp findet und die umliegenden Zellen richtig zuordnet.

Damit nun alle Zellen analysiert werden, muss eine For-Schleife eingefügt werden. Sie gilt als eine Kontrollstruktur, um eine Gruppe von Anweisungen mit einer bestimmten Anzahl zu wiederholen. In dem Programm werden zwei For-Schleifen ineinander verwendet:

```
for (zeile = (1:anzZeilen))  
    for (spalte = (1:anzSpalten))  
        %Anweisung  
    endfor  
endfor
```

Die äussere For-Schleife dient der Abfrage der Zeile. Es wird jede Zeile von der ersten bis zur letzten, was der kompletten Anzahl Zeilen entspricht, durchgegangen. Um nun nicht die ganze Zeile, sondern einen bestimmten Wert darin anzusprechen, wird eine weitere For-Schleife für die Spalte definiert. Somit wird für jede Zeile jede Koordinate durch Spalten eingeteilt und analysiert. Mit der Anweisung, eine kleine 3x3 Matrix für jede Koordinate aufzustellen, rechnet Octave jeden Wert durch.

Diese Einteilung wird nun beim Ausgleich der Matrix benötigt. In der Realität wird die Frequenz von einer x-beliebigen Anzahl von Einflüssen verändert. Die Länge der Verbindung der Kraftwerksinseln und ihre Grösse spielen eine wichtige Rolle, um den Ausgleich zwischen ihnen zu bestimmen. Solch genaue Änderungen sind in einem Programm, welches in Octave geschrieben ist und welches im Rahmen einer Maturaarbeit geschrieben wird, nicht möglich, einzuberechnen. Deshalb wurde eine einfachere Methode gewählt, um dennoch den Ausgleich, abhängig von den umliegenden Kraftwerken, zu simulieren. Hierzu wurde der Mittelwert jeder 3x3 Matrix errechnet, und alle Werte dieser Matrix gleichgesetzt.

Zellentyp 1	Zellentyp 2	Zellentyp 3
0 0 0	0 0 0	50 50 50
0 50 50	50 50 50	50 50 50
0 50 50	50 50 50	50 50 50

Um den Mittelwert zu berechnen, wird in 3 Zellentypen unterschieden. Der Zellentyp 1 entspricht den Eckfeldern, Typ 2 den Randfeldern und Typ 3 den Feldern in der Mitte. Diese Einteilung dient der Bestimmung des Mittelwertes. So werden bei Zellentyp 1 die vier vorhandenen Felder addiert und durch die Information, dass Zellentyp 1 vier Felder mit Werten hat, das Ergebnis der Addition durch vier geteilt. Dieser Mittelwert wird ebenso auch beim Zellentyp 2 mit sechs Feldern und auch Zellentyp 3 mit insgesamt neun Feldern neu berechnet.

Nun wird bei jedem Feld mithilfe der For-Schleife der Wert in der 3x3 Matrix, welcher über 0.00 liegt dem Mittelwert gleichgesetzt. Die Bedingung Mittelwert > 0.00 wird eingefügt, um den umliegenden Feldern, welche nicht zur ganzen Matrix gehören, keine Werte zuzuschreiben.

Es entsteht eine neue Grossmatrix mit den Mittelwerten. Dieser Ausgleich kann nun weitergeführt werden, indem man die Anzahl der Durchgänge angibt. Hierbei gibt das Programm bei jedem Durchlauf die Endmatrix und die Anzahl der Durchgänge aus. Um ein realistischeres System zu simulieren, wird nach jedem Durchgang eine zufällige Anzahl Fehler bzw. Störungen in die Matrix eingebaut.

Resultate und Erkenntnisse

In Octave ist es möglich, im Hauptprogramm die maximale Frequenz und die minimale Frequenz anzugeben. Hierzu wurde für die Versuche eine Spanne von 49 bis 51 Hz verwendet. Um die Matrix einzugrenzen, und nicht zu lange Berechnungen zu haben, wurde eine 10x10 Matrix verwendet. Zusätzlich ist es möglich, die Anzahl der Durchgänge anzugeben.

Versuch in Octave

Bei den Berechnungen in Octave habe ich mit einer unterschiedlichen Anzahl an Durchgängen den Ausgleich simuliert. Hierbei habe ich festgestellt, dass sich die Matrix nach 7-8 Durchläufen vollständig ausglich. Dieses Resultat war zu erwarten, da die Matrix mit zufälligen Werten aus einem Intervall initialisiert wird. Die an sich zufälligen Werte werden dann bei jedem Durchlauf lokal gemittelt und über die gesamte Matrix ergibt dies aufgrund dieses Verfahrens nach ausreichend Durchläufen einen Mittelwert. Dieser Mittelwert entsteht auch dadurch, dass der Zufallsgenerator bei der Initialisierung der Matrix relativ gut gleichmässig verteilte (normalverteilte) Werte erzeugt. Würde die Random-Funktion z.B. mehrheitlich eher tiefere Werte (gegenüber der Sollfrequenz von 50Hz) liefern, so wäre der Mittelwert letztlich auch eher tiefer als der Sollwert und das Gleiche würde für eher höhere Werte analog gelten. Octave bietet für die Randomfunktion auch andere Verteilungskurven an, ich habe jedoch die Standardverteilung genommen, um die Realität möglichst realistisch abzubilden, da jedes Kraftwerk versuchen wird, die 50 Hz Sollfrequenz zu erreichen und daher der Mittelwert über alle Kraftwerke (ohne Störung) bei 50Hz liegen sollte. Interessant wäre es, wenn man als Anschauung ein Programm entwickeln würde, welches als Vergleich z.B. den Mittelwert aller Werte tiefer als 50Hz nimmt und so z.B. eine Fehlfunktion der Ausgleichsfunktion der Kraftwerke simuliert. In meinem Fall habe ich nach jedem Durchlauf zufällige Kraftwerke bzw. Elemente der Matrix auf zufällige Werte gesetzt, so wie es letztlich auch in der Realität geschieht. Das Stromnetz an sich ist nie deterministisch bezüglich der Sollfrequenz, der Zustand ist in jeder Sekunde neu und aufgrund der wechselnden Nachfrage durch die Verbraucher nie mit absoluter Genauigkeit vorhersagbar. Daher gibt es in der Realität kein ausgeglichenes Netz, aber über das gesamte Netz ergibt sich dann trotzdem ein Mittelwert, welcher letztlich um den Sollwert schwingt. Dies versuche ich mit diesen -nach jedem Durchlauf eingefügten- Zufallswerten zu simulieren.

Ungenauigkeit des Programmes

Bei der Bearbeitung des Programmes stellte ich fest, dass viele Einflüsse auf das Stromnetz nicht miteinberechnet werden können, da eine solche Simulation nicht im Rahmen einer Maturaarbeit läge. Deshalb habe ich mich bei dem Programm für eine triviale Mittelwertannahme entschieden.

Schlusswort

Für eine zukünftige Arbeit würde ich es zum Schwerpunkt setzen, die Umwelteinflüsse und saisonbedingte Nachfrage des Strombedarfs in dieses Programm einzubauen. Für eine solche Simulation würde ich ein kleines Gebiet als Abbild verwenden, um eine bessere Übersicht über die Verbraucher und Produzenten zu erlangen.

Das ursprünglich geplante Programm hat sich als schwieriger und umständlicher als gedacht herausgestellt. Die Komplexität der Einflüsse auf das Netz und der Verteilung der Kapazitäten sind für eine Maturaarbeit nicht geeignet.

Dank meiner Informationen und Onlinerecherchen habe ich viel über das Schweizer Stromnetz erfahren und die Risiken eines Blackouts erkannt. Das Schreiben des Programmes in Octave war eine äusserst wertvolle Erfahrung. Insbesondere stellte ich fest, dass die Suche nach Programmfehlern äusserst aufwändig ist. Es zeigte sich, dass diese Fehlersuche etwa 1/9 der Zeit in Anspruch genommen hat. Die Arbeit selbst hat mir Spass gemacht, jedoch habe ich den Aufwand der Arbeit anfangs unterschätzt, insbesondere das Programmieren einer Simulation.

Die Arbeit hat mir wertvolle neue Einblicke gegeben, welche mir in meinem weiteren Leben von Nutzen sein werden.

Auf meiner Webseite <http://www.SimonRohrbach.ch/Maturaarbeit2019> stehen alle Programmcodes zum Download zur Verfügung.

Literaturliste

Büro für Technikfolgen-abschätzung (2014). Laufende Untersuchungen <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/index.html> (Stand:8.10.2019)

Eidgenössisches Departement UVEK(2019).Grundsätze der Energiepolitik <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/energie/grundsaeetze-der-energiepolitik.html> (Stand: 19.9.2019)

Energietechnische Gesellschaft(2014). Warum haben wir heute die Frequenz 50 Hz? <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/informationen/2014-1-h1-neidhoefer-frequenz> (Stand: 19.10.2019)

Hanspeter Huggenbühl (2018). Wie die Schweiz vom Stromimport abhängig wird. <https://www.infosperber.ch/Umwelt/Wie-die-Schweiz-vom-Stromimport-abhangig-wird> (Stand: 6.10.2019)

Helmut Stalder (2019). Die Schweiz steuert auf einen Strommangel zu. <https://www.nzz.ch/meinung/drohender-strommangel-die-schweiz-braucht-einen-elektroschock-ld.1483578> (Stand: 25.9.2019)

Hubert Selhofer (2009). Einführung in GNU Octave. <http://math.jacobs-university.de/oliver/teaching/tuebingen/octave/octave/octave.html#SECTION000320000000000000> (Stand: 20.10.2019)

IB-Haertling (2019). Was ist ein Powerblackout.http://www.ib-haertling.de/amateurfunk/Blackout_verkurtz.pdf (Stand: 18.10.2019)

Kernkraftwerk Leibstadt(2019). So funktioniert ein Kernkraftwerk. <https://www.kkl.ch/kernenergie/unser-kraftwerk/funktion-des-kernkraftwerks.html> (Stand: 18.9.2019)

Next-Kraftwerke (2019). Was ist ein Schwarzstart. <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/schwarzstart> (Stand: 19.10.2019)

Richard Graf, Rainer Lietzow (2018). Netzwiederaufbau nach einer Grosstörung. <https://www.bulletin.ch/de/news-detail/netzwiederaufbau-nach-einer-grossstoerung.html> (Stand: 19.9.2019)

Schweizerischer Wasserwirtschaftsverbund (2019). Strombedarf und –produktion. <https://www.swv.ch/fachinformationen/wasserkraft-schweiz/stromproduktion/> (Stand:29.9.2019)

Smard (2019). So funktioniert der Strommarkt. <https://www.smard.de/home/wiki-article/446/384> (Stand: 28.9.2019)

Swissgrid (2016). Bericht Winter 2015/2016. <https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/operation/regulation/winter-planning/Bericht-Winter-2015-2016-de.pdf> (Stand:7.10.2019)

Swissgrid (2019) <https://www.swissgrid.ch/de/home.html> (Stand: 02.10.2019)

Top online (2019). Schweiz entging knapp einem Blackout

<https://www.toponline.ch/news/schweiz/detail/news/schweiz-entging-knapp-einem-blackout-00112241/> (Stand: 4.10.2019)

Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmer (2019). www.strom.ch (Stand: 6.10.2019)

Wikipedia (2019). Elektrizitätswirtschaft in der Schweiz,

https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrizit%C3%A4tswirtschaft_in_der_Schweiz (Stand: 3.9.2019)

Wikipedia (2019). Liste historischer Stromausfälle.

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_historischer_Stromausf%C3%A4lle (Stand:12.10.2019)

Wikipedia (2019). Netzschutz. [https://de.wikipedia.org/wiki/Netzschutz#Distanzschutz_\(ANSI_21\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Netzschutz#Distanzschutz_(ANSI_21)) (Stand: 19.9.2019)

Wikipedia (2019). Redispatch <https://de.wikipedia.org/wiki/Redispatch>. (Stromnetz) (Stand: 6.9.2019)

Wikipedia (2019). Stromnetz.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#/media/Datei:Stromversorgung.svg> (Stand: 23.10.2019)

Eine gute Simulation der Komplexität des Ausgleichs findet sich unter: <https://www.next-kraftwerke.com/virtual-power-plant-vpp-simulation/> (Stand: 20.10.2019)

Die zu Grunde liegende Komplexität wird in der Masterarbeit von Armin Steudte aufgezeigt. http://edoc.sub.uni-hamburg.de/haw/volltexte/2013/2174/pdf/masterthesis_steudte.pdf (Stand 20.10.2019)

Abbidungsverzeichnis

Abbildung 1 : Wikipedia (2019).

<https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#/media/Datei:Stromversorgung.svg> Stromnetz. (Stand: 23.10.2019)

Abbildung 2 : Schweizerischer Wasserwirtschaftsverbund (2019). Strombedarf und –produktion.

<https://www.swv.ch/fachinformationen/wasserkraft-schweiz/stromproduktion/> (Stand:29.9.2019)

Abbildung 3 : Smard (2019). So funktioniert der Strommarkt. <https://www.smard.de/home/wiki-article/446/384> (Stand: 28.9.2019)

Abbildung 4: Smard (2019). So funktioniert der Strommarkt. <https://www.smard.de/home/wiki-article/446/384> (Stand: 28.9.2019)

Zitat

Wirtschaftsminister Philipp Rösler Mai, 2011. In: Stromnetzversorgung

<https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#/media/Datei:Stromversorgung.svg> (Stand:12.10.2019)

Anhang

Octave(Matlab) Programmcode

Das Programm besteht aus zwei Funktionen:

1. Erzeugen einer Matrix, in welcher die einzelnen Elemente die Stromerzeuger darstellen.
2. Funktion, welche die zufälligen Werte der Matrix auszugleichen versucht.

1. Matrix erzeugen

function B =

```
Create_Matrix(minFrequenz,maxFrequenz,anzSpalten,anzZeilen)
```

```
B = randomArray = minFrequenz + (maxFrequenz-  
minFrequenz)*rand(anzSpalten,anzZeilen);
```

Endfunktion

2. Matrix ausgleichen

```
% -----
```

```
% Maturaarbeit 2019 von Simon Rohrbach
```

```
% -----
```

```
clc
```

```
minFrequenz = 49
```

```
maxFrequenz = 51
```

```
anzSpalten = 10
```

```
anzZeilen = 10
```

```
anzahlDurchlaeufer = 12
```

```
anzahlError = 5;
```

```
B = Create_Matrix(minFrequenz,maxFrequenz,anzSpalten,anzZeilen);
```

```
for (i = 1:anzahlDurchlaeufer)
```

```
    for (zeile = (1:anzZeilen))
```

```

for (spalte = (1:anzSpalten))

    oben = 0;

    rechtsoben = 0;

    rechts = 0;

    rechtsunten = 0;

    unten = 0;

    linksunten = 0;

    links = 0;

    linksoben = 0;

    Aktuelle_Zelle = B(zeile,spalte); % Wert der Zelle

    Zellentyp = 0;

    % ----- %

    % Erkennen, welche Zelle wir gerade betrachten

    % ----- %

    % ----- %

    %Eckzellen

    % ----- %

    % Zelle Links oben, Typ = 1

    if ((zeile == 1) && (spalte == 1))

        Zellentyp = 1;

        rechts = B(zeile,spalte+1);

        rechtsunten = B(zeile+1,spalte+1);

        unten = B(zeile+1,spalte);

    end

    % Zelle Rechts oben, Typ = 1

    if ((zeile == 1) && (spalte == anzSpalten))

        Zellentyp = 1;

        unten = B(zeile+1,spalte);

```

```
linksunten = B(zeile+1,spalte-1);
```

```
links = B(zeile,spalte-1);
```

```
end
```

```
% Zelle Rechts unten, Typ = 1
```

```
if ((zeile == anzZeilen) && (spalte == anzSpalten))
```

```
Zellentyp = 1;
```

```
oben = B(zeile-1,spalte);
```

```
linksoben = B(zeile-1,spalte-1);
```

```
links = B(zeile,spalte-1);
```

```
end
```

```
% Zelle Links unten, Typ = 1
```

```
if ((zeile == anzZeilen) && (spalte == 1))
```

```
Zellentyp = 1;
```

```
oben = B(zeile-1,spalte);
```

```
rechtsoben = B(zeile-1,spalte+1);
```

```
rechts = B(zeile,spalte+1);
```

```
end
```

```
% ----- %
```

```
% ----- %
```

```
%Randzellen
```

```
% ----- %
```

```
% Zelle oben, Typ = 2
```

```
if ((zeile == 1) && ((spalte > 1) && ( spalte < anzSpalten)))
```

```
Zellentyp = 2;
```

```
links = B(zeile,spalte-1);
```

```
linksunten = B(zeile+1,spalte-1);
```

```
unten = B(zeile+1,spalte);
```

```
rechtsunten = B(zeile+1,spalte+1);
```

```
rechts = B(zeile,spalte+1);
```

```
end
```

```
% Zelle rechts, Typ = 2
```

```
if (((zeile > 1) && (zeile < anzZeilen)) &&  
      (spalte == anzSpalten))
```

```
Zellentyp = 2;
```

```
oben = B(zeile-1,spalte);
```

```
linksoben = B(zeile-1,spalte-1);
```

```
links = B(zeile,spalte-1);
```

```
linksunten = B(zeile+1,spalte-1);
```

```
unten = B(zeile+1,spalte);
```

```
end
```

```
% Zelle unten, Typ = 2
```

```
if (((zeile == anzZeilen)&&(spalte > 1) &&  
      (spalte < anzSpalten)))
```

```
Zellentyp = 2;
```

```
links = B(zeile,spalte-1);
```

```
linksoben = B(zeile-1,spalte-1);
```

```
oben = B(zeile-1,spalte);
```

```
rechtsoben = B(zeile-1,spalte+1);
```

```
rechts = B(zeile,spalte+1);
```

```
end
```

```
% Zelle links, Typ = 2
```

```
if (((zeile > 1) && (zeile < anzZeilen)) && (spalte == 1))
```

```
Zellentyp = 2;
```

```
oben = B(zeile-1,spalte);
```

```
rechtsoben = B(zeile-1,spalte+1);
```

```
rechts = B(zeile,spalte+1);
```

```
rechtsunten = B(zeile+1,spalte+1);
```

```
unten = B(zeile+1,spalte);
```

end

% Alle anderen Zellen, Typ = 3

*if (((zeile > 1) && (zeile < anzZeilen)) &&
 (spalte > 1) && ((spalte < anzSpalten)))*

Zellentyp = 3;

oben = B(zeile-1,spalte);

rechtsoben = B(zeile-1,spalte+1);

rechts = B(zeile,spalte+1);

rechtsunten = B(zeile+1,spalte+1);

unten = B(zeile+1,spalte);

linksunten = B(zeile+1,spalte-1);

links = B(zeile,spalte-1);

linksoben = B(zeile-1,spalte-1);

end

%disp ("-----")

*%disp ("zeile:"), disp (zeile),
 %disp ("spalte:"), disp (spalte)*

*%disp ("oben:"), disp (oben);
 %disp ("rechtsoben:"), disp (rechtsoben)*

*%disp ("rechts:"), disp (rechts);
 %disp ("rechtsunten:"), disp (rechtsunten)*

*%disp ("unten"), disp (unten);
 %disp ("linksunten:"), disp (linksunten)*

*%disp ("links"), disp (links);
 %disp ("linksoben:"), disp (linksoben)*

%disp ("-----")

*kleinMatrix =
 [linksoben,oben,rechtsoben;links,B(zeile,spalte),
 rechts;linksunten,unten,rechtsunten]; % 3x3 Matrix*

% ----- %

% Mittelwert bilden

% ----- %

% Eckzelle = Typ 1

if Zellentyp == 1

% Berechnung des Durchschnittwertes

durchschnitt=((linksoben + oben + rechtsoben + links +
 (B(zeile,spalte)) + rechts + linksunten +
 unten + rechtsunten)/4);

*% Berechnete Werte je nach Position in die Matrix
% zurückschreiben*

if linksoben > 0.00

linksoben = durchschnitt;

B(zeile-1,spalte-1) = durchschnitt;

end

if oben > 0.00

oben = durchschnitt;

B(zeile-1,spalte) = durchschnitt;

end

if rechtsoben > 0.00

rechtsoben = durchschnitt;

B(zeile-1,spalte+1) = durchschnitt;

end

if links > 0.00

links = durchschnitt;

B(zeile,spalte-1) = durchschnitt;

end

if B(zeile,spalte) > 0.00

B(zeile,spalte) = durchschnitt;

end

if rechts > 0.00

rechts = durchschnitt;

B(zeile,spalte+1) = durchschnitt;

end

if linksunten > 0.00

linksunten = durchschnitt;

B(zeile+1,spalte-1) = durchschnitt;

end

if unten > 0.00

unten = durchschnitt;

B(zeile+1,spalte) = durchschnitt;

end

if rechtsunten > 0.00

rechtsunten = durchschnitt;

B(zeile+1,spalte+1) = durchschnitt;

end

end

% Randzellen = Typ 2

if Zellentyp == 2

durchschnitt=((linksoben + oben + rechtsoben + links +
(B(zeile,spalte)) + rechts + linksunten +
unten + rechtsunten)/6);

*% Berechnete Werte je nach Position in die
% Matrix zurückschreiben*

if linksoben > 0.00

linksoben = durchschnitt;

B(zeile-1,spalte-1) = durchschnitt;

end

if oben > 0.00

oben = durchschnitt;

B(zeile-1,spalte) = durchschnitt;

end

if rechtsoben > 0.00

rechtsoben = durchschnitt;

B(zeile-1,spalte+1) = durchschnitt;

```
end

if links > 0.00

    links = durchschnitt;

    B(zeile,spalte-1) = durchschnitt;

end

if B(zeile,spalte) > 0.00

    B(zeile,spalte) = durchschnitt;

end

if rechts > 0.00

    rechts = durchschnitt;

    B(zeile,spalte+1) = durchschnitt;

end

if linksunten > 0.00

    linksunten = durchschnitt;

    B(zeile+1,spalte-1) = durchschnitt;

end

if unten > 0.00

    unten = durchschnitt;

    B(zeile+1,spalte) = durchschnitt;

end

if rechtsunten > 0.00

    rechtsunten = durchschnitt;

    B(zeile+1,spalte+1) = durchschnitt;

end

end

% Innere Zellen = Typ 3

if Zellentyp == 3

    durchschnitt=((linksoben + oben + rechtsoben + links +
                    (B(zeile,spalte)) + rechts + linksunten +
                    unten + rechtsunten)/9);

    % Gemittelte Werte (Kleinmatrix) in die Grosse Matrix
    % zurückspeichern
```

```
B(zeile,spalte) = durchschnitt;

B(zeile,spalte-1) = durchschnitt;

B(zeile+1,spalte-1) = durchschnitt;

B(zeile+1,spalte) = durchschnitt;

B(zeile+1,spalte+1) = durchschnitt;

B(zeile,spalte+1) = durchschnitt;

B(zeile-1,spalte+1) = durchschnitt;

B(zeile-1,spalte) = durchschnitt;

B(zeile-1,spalte-1) = durchschnitt;

end

endfor %Spalte

endfor %Zeile

% Störungen in Matrix einbauen:
% -----

% Anzahl Störungen definieren

% Für jede Störung zufällige Positionen in der Matrix festlegen
% (zeile/spalte)

% Zufällige Störungswerte innerhalb max.Frequenz und min.Frequenz
% festlegen

% Störungen in die Matrix zurückschreiben
% -----

% Für jede Störung zufällige Positionen definieren
for (e = (1:anzahlError))

    ezeile = randi(anzZeilen);

    espalte = randi(anzSpalten);

    B(ezeile,espalte) = minFrequenz + (maxFrequenz-
        minFrequenz)*rand(1);

    %disp (B(ezeile,espalte))

endfor % e

disp (i);

disp ("Matrix:"), disp(B)
```

disp (" ")

endfor % *anzahldurchläufe*

% *Ende Netzausgleich*

Excel VBA Programmcode

Das Programm besteht aus demselben Aufbau wie bei Octave. Die Unterschiede sind durch das Programm Excel und dessen Programmiersprache VBA (Visual Basic for Application) gegeben:

		Abweichung	Formel	Faktor
Sollfrequenz	50.00	-100	100	
Untere Frequenz	49.00			
Obere Frequenz	51.00			
Zulässige Abweichung	1			
Matrix Zelle oben links	\$H\$5			
Matrix Zelle unten recht	\$R\$30			
Matrix Breite	11			
Matrix Höhe	26			
Anzahl Zellen	286			
Anz. Zufäl. Fehler	2			

VBA Programmcode:

```
' Maturarbeit 2019 Simon Rohrbach
```

```
' Aktueller Zelleninhalt
```

```
Dim aktuellerWert As Double
```

```
Dim aktuelleZelle As Variant
```

```
' Grösse bzw. Position der Matrix auslesen
```

```
Dim obenLinks As Variant
```

```
Dim untenLinks As Variant
```

```
Dim obenRechts As Variant
```

```
Dim untenRechts As Variant
```

```
Dim MatrixBreite As Integer
```

```
Dim MatrixHoehe As Integer
```

```
Dim AnzahlWerteInMatrix As Integer
```

Private Declare Function GetAsyncKeyState Lib "user32" (ByVal vKey As Long) As **Integer** ' Aus dem Internet geklaut

Sub btn_loop()

btn_1_Random

Do

DoEvents ' Falls Ereignisse von Windows vorhanden sind, dann diese ausführen

Application.ScreenUpdating = False ' Bildschirm nicht aktualisiern

btn_2_Step

fehler_einbauen

Application.ScreenUpdating = **True**

ActiveSheet.Calculate

If (GetAsyncKeyState(&H1B)) <> 0 **Then** Exit **Do Loop** Until 1 = 2

End Sub

' Matrix erzeugen

Sub btn_1_Random()

' Matrixgröße lesen

obenLinks = Range("C11")

obenLinksAbs = Range("\$C\$11")

untenRechts = Range("C12")

MatrixBreite = Range("C13")

MatrixHoehe = Range("C14")

' Beginn von oben links

aktuelleZelle = obenLinksAbs

'Range("E23").Value = aktuelleZelle ' debug

' Zufällige Werte in Zellen schreiben

With ThisWorkbook.Sheets("Tabelle1")

```
For zeile = 0 To MatrixHoehe - 1
    For spalte = 0 To MatrixBreite - 1
        Randomize
        Range(aktuelleZelle).Offset(zeile, spalte).Value = ((Rnd * 2) + 49)
    Next spalte
Next zeile

' Matrix Beschriftung
Range("G4").Value = ""
For Z = 1 To MatrixBreite
    Range("G4").Offset(0, Z).Value = Z
Next Z
For s = 1 To MatrixHoehe
    Range("G4").Offset(s, 0).Value = s
Next s
End With

Range("S1:ZZ256").Value = ""

Application.Calculation = xlManual
End Sub

'Variablen berechnen bzw. Durch die Matrix rennen
Sub btn_2_Step()

    ' bilde Mittelwert aus allen Nachbarn
    ' bilde differenz aus nachbarmittelwert und Wert
    ' Gleiche aus: Nimm von jedem Nachbarn soviel, bis Wert = neuer Mittelwert
    ' tue dies für alle Zellen
    ' Koordinaten der Zellen relativ zur aktuellen Zelle:
    ' -1 / -1 , -1 / 0 , -1 / +1
    ' 0 / -1 , 0 / 0 , 0 / +1
    ' +1 / -1 , +1 / 0 , +1 / +1
```

With ThisWorkbook.Sheets("Tabelle1")

AnzahlWerteInMatrix = MatrixBreite * MatrixHoehe

obenRechts = Range(obenLinks).Offset(0, MatrixBreite - 1).Address

untenLinks = Range(obenLinks).Offset(MatrixHoehe - 1, 0).Address

' aktuellen Zellenwert holen

aktuellerWert = Range(obenLinks).Value

' Durchsuche Nachbarzellen und kopiere alle in eine temporäre matrix

Dim NachbarLinks As **Variant**

Dim NachbarLinksOben As **Variant**

Dim NachbarOben As **Variant**

Dim NachbarRechtsOben As **Variant**

Dim NachbarRechts As **Variant**

Dim NachbarRechtsUnten As **Variant**

Dim NachbarUnten As **Variant**

Dim NachbarLinksUnten As **Variant**

' einen Zyklus durchlaufen bzw. einmal durch die Matrix

For Zeile = 1 **To** MatrixHoehe

For Spalte = 1 **To** MatrixBreite

'Range("E23").Value = aktuelleZelle 'debug

 NachbarLinksOben = ""

 NachbarOben = ""

 NachbarRechtsOben = ""

 NachbarLinks = ""

 NachbarRechts = ""

 NachbarLinksUnten = ""

 NachbarUnten = ""

 NachbarRechtsUnten = ""

```

'-----
' Alle Eckpunkte behandeln und deren Nachbarn merken.
If aktuelleZelle = obenLinks Then
    nachbarRechts = Range(aktuelleZelle).Offset(0, 1).Address
    nachbarRechtsUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 1).Address
    nachbarUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 0).Address
End If

If aktuelleZelle = untenLinks Then
    nachbarOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 0).Address
    nachbarRechtsOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 1).Address
    nachbarRechts = Range(aktuelleZelle).Offset(0, 1).Address
End If

If aktuelleZelle = obenRechts Then
    nachbarLinks = Range(aktuelleZelle).Offset(0, -1).Address
    nachbarUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 0).Address
    nachbarLinksUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, -1).Address
End If

If (aktuelleZelle = untenRechts) Then
    nachbarLinks = Range(aktuelleZelle).Offset(0, -1).Address
    nachbarLinksOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, -1).Address
    nachbarOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 0).Address
End If

" '-----
' ' Zeile Oben -> Nachbarn merken
' ' Zeile = 1, Spalte = 2...(maxSpalte-1)
If (zeile = 1) And ((spalte > 1) And (spalte < MatrixBreite)) Then
    nachbarLinks = Range(aktuelleZelle).Offset(0, -1).Address

```

```
nachbarRechts = Range(aktuelleZelle).Offset(0, 1).Address  
nachbarRechtsUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 1).Address  
nachbarUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 0).Address  
nachbarLinksUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, -1).Address
```

End If

' Zeile Unten

' Zeile = maxZeile, Spalte = 2...(maxSpalte-1)

If (zeile = MatrixHoehe) And ((spalte > 1) And (spalte < MatrixBreite)) **Then**

```
nachbarLinks = Range(aktuelleZelle).Offset(0, -1).Address  
nachbarLinksOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, -1).Address  
nachbarOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 0).Address  
nachbarRechtsOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 1).Address  
nachbarRechts = Range(aktuelleZelle).Offset(0, 1).Address
```

End If

' Spalte links

' Zeile = 2...(maxZeile-1), Spalte = 1

If (spalte = 1) And ((zeile > 1) And (zeile < MatrixHoehe)) **Then**

```
nachbarOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 0).Address  
nachbarRechtsOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 1).Address  
nachbarRechts = Range(aktuelleZelle).Offset(0, 1).Address  
nachbarRechtsUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 1).Address  
nachbarUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 0).Address
```

End If

' Spalte rechts

' Zeile = 2...(maxZeile-1), Spalte = maxSpalte

If (spalte = MatrixBreite) And ((zeile > 1) And (zeile < MatrixBreite)) **Then**

```
nachbarLinks = Range(aktuelleZelle).Offset(0, -1).Address  
nachbarLinksOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, -1).Address  
nachbarOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 0).Address  
nachbarUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 0).Address
```

```

        NachbarLinksUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, -1).Address
End If
'-----

'
' Alle restlichen Zellen -> Nachbarn merken
'
' Zeile = 2..(maxZeile-1), Spalte = 2..(maxSpalte-1)
If ((zeile > 1) And (zeile < MatrixHoehe)) And ((spalte > 1) And (spalte < MatrixBreite)) Then
    NachbarLinks = Range(aktuelleZelle).Offset(0, -1).Address
    NachbarLinksOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, -1).Address
    NachbarOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 0).Address
    NachbarRechtsOben = Range(aktuelleZelle).Offset(-1, 1).Address
    NachbarRechts = Range(aktuelleZelle).Offset(0, 1).Address
    NachbarRechtsUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 1).Address
    NachbarUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, 0).Address
    NachbarLinksUnten = Range(aktuelleZelle).Offset(1, -1).Address
End If

' call ausgleichsfunktion (1 plus 8 parameter)
ausgleich aktuelleZelle, NachbarLinks, NachbarLinksOben, NachbarLinksUnten, NachbarOben, _
    NachbarRechts, NachbarRechtsOben, NachbarRechtsUnten, NachbarUnten

' Beim 1. Durchgang ist die aktuelleZelle obenLinks.
' Nach dem Durchgang setzen wir nun die aktuelle Zelle auf deren Nachbarzelle rechts davon (die
Matrix wird
' Zeile für Zeile und Spalte für Spalte durchgelesen. Also bei einer 3x3: x1,x2,x3, y1, y2, y3, z1, z2, z3
' Da Zeile und Spalte je bei 1 beginnen, müssen wir diese 1 vom Index immer abziehen.
If (spalte < MatrixBreite) Then
    aktuelleZelle = Range(aktuelleZelle).Offset(0, 1).Address ' Offset: (row, Column)
End If
Next spalte
If (zeile < MatrixHoehe) Then
    aktuelleZelle = Range(obenLinks).Offset(zeile, 0).Address ' Offset: (row, Column)
End If

```

Next zeile

aktuelleZelle = obenLinks

End With

fehler_einbauen ' *Zufällige Fehler einbauen*

Mittlere_Netzfrequenz

End Sub

Sub btn_Zyklus()

With ThisWorkbook.Sheets("Tabelle1")

For anzahl = 1 To Range("C16").Value

Application.ScreenUpdating = **False**

btn_2_Step ' Einmal durch die Matrix

Application.ScreenUpdating = **True**

ActiveSheet.Calculate

Next anzahl

End With

End Sub

Sub fehler_einbauen()

Dim anzahlFehler As **Integer**

Dim zeilenIndex As **Integer**

Dim spaltenIndex As **Integer**

With ThisWorkbook.Sheets("Tabelle1")

If Trim(Range("C17").Value) <> "" **Then**

anzahlFehler = Range("C17").Value

Else

anzahlFehler = 0

End If

For fehler = 1 **To** anzahlFehler

```

Randomize

zeilenIndex = Int((MatrixHoehe - 0) * Rnd + 0)

spaltenIndex = Int((MatrixBreite - 0) * Rnd + 0)      '(Oberer Bereich - Unterer Bereich) * Rnd + Unterer Bereich'

Range(obenLinks).Offset(zeilenIndex, spaltenIndex).Value = ((Range("C6").Value - Range("C5").Value) * Rnd) + _
                                                    Range("C5").Value

```

Next fehler

End With

End Sub

Sub ausgleich(Zelle As **Variant**, nbLinks As **Variant**, nbLinksOben As **Variant**, _

nbLinksUnten As **Variant**, nbOben As **Variant**, nbRechts As **Variant**, _

nbRechtsOben As **Variant**, nbRechtsUnten As **Variant**, nbUnten As **Variant**)

' Berechnung

' Wenn aktuelle Zelle(aZ) unterfrequenz hat, dann saugt sie aus der Umgebung. Falls Umgebung grösser als aktuelle Zelle, ,dann saugt sie auch.

' -> Mittelwert aus umliegenden und aZ bilden. Alle Zellen entsprechend verrechnen. Manche geben, manche nehmen. Neue ,Werte dann abspeichern.

' die für die ganze Matrix 1mal = 1 Zyklus.

' Totalausfall nicht beachten, da diese erst nach Erreichen der Zielfrequenz wieder ins Netz integriert werden.

Dim mittelwert As **Variant**

Dim zaehler As **Integer**

Dim summe As **Variant**

With ThisWorkbook.Sheets("Tabelle1")

zaehler = 1 *'die Zelle selbst ist nie leer*

summe = Range(Zelle).Value

If nbLinks <> "" **Then**

zaehler = zaehler + 1

summe = summe + Range(nbLinks).Value

End If

If nbLinksOben <> "" **Then**

 zaehler = zaehler + 1

 summe = summe + Range(nbLinksOben).Value

End If

If nbLinksUnten <> "" **Then**

 zaehler = zaehler + 1

 summe = summe + Range(nbLinksUnten).Value

End If

If nbOben <> "" **Then**

 zaehler = zaehler + 1

 summe = summe + Range(nbOben).Value

End If

If nbRechts <> "" **Then**

 zaehler = zaehler + 1

 summe = summe + Range(nbRechts).Value

End If

If nbRechtsOben <> "" **Then**

 zaehler = zaehler + 1

 summe = summe + Range(nbRechtsOben).Value

End If

If nbRechtsUnten <> "" **Then**

 zaehler = zaehler + 1

 summe = summe + Range(nbRechtsUnten).Value

End If

If nbUnten <> "" **Then**

 zaehler = zaehler + 1

 summe = summe + Range(nbUnten).Value

End If

'Mittelwert der Nachbarn ermitteln, inkl. der Zelle!

' es gibt 3 Fälle:

' 1. Eckzellen -> zaehler wird dann 4 für 3 Nachbarzellen

' 2. Seitenzellen -> zaehler wird dann 6 für 5 Nachbarzellen

' 3. Innere Zellen -> zaehler wird dann 9 für 8 Nachbarzellen

mittelwert = summe / zaehler

' Den Mittelwert in die Zelle zurück schreiben

If nbLinks <> "" **Then**

 Range(nbLinks).Value = mittelwert

End If

If nbLinksOben <> "" **Then**

 Range(nbLinksOben).Value = mittelwert

End If

If nbLinksUnten <> "" **Then**

 Range(nbLinksUnten).Value = mittelwert

End If

If nbOben <> "" **Then**

 Range(nbOben).Value = mittelwert

End If

If nbRechts <> "" **Then**

 Range(nbRechts).Value = mittelwert

End If

If nbRechtsOben <> "" **Then**

 Range(nbRechtsOben).Value = mittelwert

End If

If nbRechtsUnten <> "" **Then**

 Range(nbRechtsUnten).Value = mittelwert

End If

If nbUnten <> "" **Then**

 Range(nbUnten).Value = mittelwert

End If

 Range(Zelle).Value = mittelwert

End With

,

End Sub

Sub Mittlere_Netzfrequenz()

' duch das ganze Netz laufen

Dim summe As **Variant**

Dim frequenz As **Variant**

summe = 0

For zeile = 0 **To** MatrixHoehe - 1

For spalte = 0 **To** MatrixBreite - 1

 summe = summe + Range(obenLinks).Offset(zeile, spalte).Value ' *Offset: (row, Column)*

Next spalte

 aktuelleZelle = obenLinks

Next zeile

frequenz = summe / AnzahlWertInMatrix

Range("C30").Value = frequenz

End Sub

Deklaration

Ich erkläre hiermit,

- dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und mithilfe der angegebenen Quellen verfasst habe,
- dass ich auf Mithilfe Dritter in der Arbeit ausdrücklich hingewiesen habe.

Ort, Datum: Arlesheim 28.10.2019

Unterschrift: S. Rohrbach