KRYPTOGRAFIE – INFORMATIK DES VERTRAUENS

Thomas Schaller – E-Mail: t.schaller@gymnasium.ettenheim.de – Januar 2017

Dieses Hintergrunddokument basiert auf den Unterlagen zum Jahreskurs Informatik 2016-2018. Es wurde von L. Dietrich und U. Lautebach erstellt und für die ZPG Materialien von T. Schaller entsprechend gekürzt. Ich danke den Autoren für die Genehmigung, das Dokument für die ZPG zu verwenden.

INHALTSVERZEICHNIS

Informatik und Vertrauen

Landläufig wird die Kryptografie meistens nur mit dem →[1]Verschlüsseln (Chiffrieren) von Nachrichten in Verbindung gebracht: Der Absender verschlüsselt sie, weil er ihrem Überbringer nicht ausreichend vertraut. Der soll den Inhalt aber nicht erfahren.

Tatsächlich ist die Kryptografie aber bei Weitem vielseitiger: Sie kommt immer dann zum Einsatz, wenn irgendwo eine bestimmte Art von Vertrauen fehlt; ihre Aufgabe ist es jeweils, dieses Vertrauen entweder herzustellen oder zu ersetzen. Insofern behandelt die Kryptografie als Teilgebiet der Informatik durchaus ein menschliches Grundbedürfnis.

Auch eine verschlüsselte Nachricht kann dem Boten immer noch einiges verraten: Er erfährt Absender und Empfänger der Nachricht sowie (zumindest ungefähr) ihre Länge. Auch Zeitpunkte und Häufigkeit des Nachrichtenaustauschs kann er protokollieren und daraus seine Schlüsse ziehen. Diese „Metadaten“ haben den zweifelhaften Charme, dass sie sich platzsparend speichern und sehr leicht auch automatisiert auswerten lassen, was für den Inhalt selber in der Regel nicht so einfach geht. Kostenlose Messengerdienste wie WhatsApp erwirtschaften durch den Verkauf oder die Nutzung dieser Metadaten (in der Regel für personalisierte Werbung) ihren Konzerngewinn.

Der Bote kann die verschlüsselte Nachricht verspätet zustellen, verändern, verschwinden lassen oder auch komplett durch eine andere ersetzen – eine intakte Verschlüsselung bietet nur Vertraulichkeit, mehr nicht. Sie stellt das Vertrauen her, dass der Bote den Inhalt der Nachricht nicht erfährt. Alle anderen Probleme lässt sie offen; für einige davon gibt es kryptografische Lösungen, für andere nicht.

Interessant ist immer die Frage, um welche Art von Vertrauen es eigentlich geht. Oft findet man anschauliche Beispiele aus dem täglichen Leben:

Alltags-beispiel	**Um welches Vertrauen geht es?**	**Kryptografische Entsprechung**	**Kryptografisch relevant**
Spickzettel	Ich verberge schon die Nachricht selber, nicht nur ihren Inhalt. Im Altertum schrieb man einem Boten auf die rasierte Kopfhaut; sobald die Haare nachgewachsen waren, lief er los. Da hatte man eben Zeit...	Steganografische Verfahren verbergen Information z.B. in den niederwertigsten Bits von .bmp- oder -wav-Dateien.	
Fest verschließbare Kiste	„Der Bote ist zwar neugierig. Aber wenn die Kiste hält, was sie verspricht, kann er die Nachricht darin nicht gelesen haben.“	→Chiffre	→Vertraulichkeit (Geheimhaltung)

1Der Pfeil → verweist bei Fachwörtern auf Einträge im Glossar ab Seite 20.

Alltags-beispiel	**Um welches Vertrauen geht es?**	**Kryptografische Entsprechung**	**Kryptografisch relevant**
Brief mit Siegel oder Unterschrift	„Dieser Brief stammt wirklich von Peter. Peter war beim Unterschreiben mit dem Inhalt einverstanden. Allerdings könnte der Text danach verändert worden sein.“		→Authentizität →abstreitbar →Integrität ist nicht gesichert
Brief einlaminiert, Siegel auf der Folie	„Peter selbst hat diesen Brief abgeschickt. Der Text kann danach nicht verändert worden sein.“	Kryptografische →Signatur	Authentizität, nicht abstreitbar Integrität
Personalausweis	„Dieses Gesicht und dieser Name gehören wirklich zusammen.“ … denn: „Die Bundesdruckerei prüft Anträge sehr sorgfältig, bevor sie für jemanden einen Ausweis herstellt.“ Aber: Wer den Ausweis vorzeigt, muss deswegen noch lange kein ehrlicher Mensch sein.	→Zertifikat f. öffentlichen Schlüssel	Vertrauen in Zertifizierungsstelle (z.B. Verisign)... … überträgt sich auf die Identität (aber nicht auf andere Eigenschaften) des Zertifikatinhabers

Die Hauptdarsteller und das Stück

Die Veranschaulichung kryptografischer Abläufe ist traditionell die Aufgabe von Alice und Bob, deren Nachrichtenaustausch leider immer wieder von ihren Widersachern Eve und Mallory angegriffen wird:

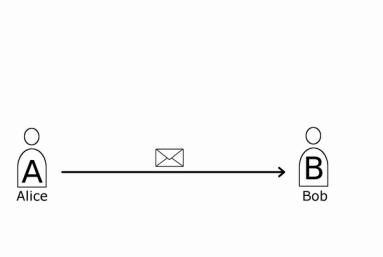


Abbildung 1: Alice und Bob sind die beiden Kommunikations-partner. Im Basisszenario sendet Alice eine Nachricht an Bob.

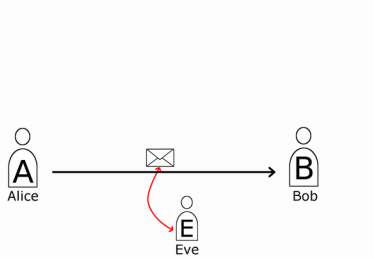


Abbildung 2: Eve (engl. eavesdrop: lauschen) versucht die Nachricht passiv mitzulesen.

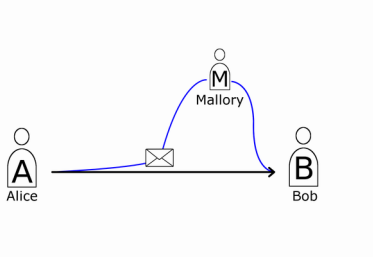


Abbildung 3: Mallory (man-in-the-middle) will die Kommunikation aktiv manipulieren.

Die Problematik des Angriffs durch Eve oder Mallory ergibt sich, da das Internet grundsätzlich als unsicherer Kanal anzusehen ist. Die Nachrichten werden über viele Stationen (Router) weitergegeben. Jeder der Zugriff auf einen dieser Router hat, kann die Nachricht abfangen. Die NSA hat vorgemacht, dass dies in großem Stil für einen Großteil der gesendeten Daten möglich ist. Man muss davon ausgehen, dass unverschlüsselt versendete Daten den Charakter einer Postkarte haben. Jeder Postmitarbeiter, der die Postkarte in der Hand hat, kann sie lesen, Text hinzufügen, sie wegwerfen, eine neue Postkarte im Namen des Absenders verfassen uvm. Dies ist leider vielen nicht im Bewusstsein, da die Daten unsichtbar über Kabel versendet werden. Das erweckt den Anschein einer sicheren Kommunikation.

Die folgenden Kapitel behandeln zunächst klassische Chiffren. Sie heißen symmetrisch, weil Alice und Bob über denselben geheimen Schlüssel verfügen müssen. Einige moderne (asymmetrische) Verfahren sind darauf nicht mehr angewiesen; sie sind notwendig, um das Problem des Schlüsselaustauschs über einen unsicheren Kanal zu lösen. In den letzten Kapiteln kommen einige moderne Anwendungen zur Sprache.

Symmetrische Chiffren

Klassische Chiffren heißen →symmetrisch, weil Absender und Empfänger den gleichen Schlüssel haben, mit dem die Nachricht ver- und entschlüsselt wird. Sie verfügen also über ein gemeinsames Geheimnis. Obwohl →asymmetrische Kryptosysteme oft „moderne" Kryptoverfahren genannt werden, weil sie erst im 20. Jahrhundert aufkamen und ganz neue Möglichkeiten bieten, sind die symmetrischen Chiffren nach wie vor unverzichtbar. Bei Schülern entsteht oft die Fehlvorstellung, asymmetrische Verfahren seien irgendwie „besser", weil sie neuer sind; tatsächlich eröffnen sie nur andere Einsatzgebiete. Ein Beispiel hierfür ist →SSL/TLS, das sowohl auf starke symmetrische als auch asymmetrische Chiffren angewiesen ist.

Didaktisch-methodische Hinweise

Die Auswahl der hier vorgestellten symmetrischen Chiffren ist unvollständig. Die Caesar-Chiffre bietet als Einstieg aber den Vorteil, dass fundamentale Begriffe und Vorgänge (Nachricht, →Klartext, →Chiffretext, →Chiffre, →Schlüssel, →chiffrieren/dechiffrieren, →brechen, →Angriff) an einem sehr einfachen Beispiel erläutert werden können. In der hier vorgeschlagenen Reihenfolge werden die Chiffren nacheinander gebrochen und die jeweils entscheidende Schwachstelle dann in der nächsten Chiffre geschlossen, was einen gut sichtbaren roten Faden durch die Einheit ergibt. Auch in der Geschichte der Kryptografie bewegt man sich damit allmählich voran. Dabei können aus Zeitgründen nicht alle Verfahren in Klasse 7 besprochen werden. Die Klasse 7 kann nur einen ersten Einblick in die Kryptologie gewähren.

Anfangs sind bei den Schülern insbesondere die Begriffe Chiffre, Schlüssel, ver-/entschlüsseln (de-/chiffrieren) und brechen noch sehr unscharf. Eine präzise Fachsprache erleichtert hier die Konzeptbildung (s. Glossar). Auch den Begriff →Codierung sollte man zunächst vermeiden, weil er sonst mit verschlüsseln verwechselt wird.

Es bietet sich an, die hier vorgestellten klassischen symmetrischen Chiffren alle nach dem gleichen Muster zu behandeln:

1. Wie wird verschlüsselt?
2. Wie wird entschlüsselt?
3. Welche Schwachstelle hat die Chiffre? Wie nutzt man sie aus, um die Chiffre zu brechen?

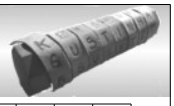
Normalerweise behandelt der Schulunterricht (aller Fächer) nur die Frage, wie etwas *funktioniert.* Dabei ist das *Versagen* eines Systems doch viel interessanter! Kryptografie bietet die Gelegenheit für einen entsprechenden Perspektivenwechsel: Beim Angriff auf eine Chiffre kann man auch einmal Fehler, Schwächen und Scheitern zum Gegenstand des Unterrichts machen. Das ist nicht nur für zukünftige Kryptologen lohnend.

Caesarchiffre (ca. 55 vor Chr.)

Die Verwendung dieser Chiffre durch Julius Caesar ist historisch verbürgt.

Verschlüsseln: Jeden Buchstaben des Klartextes verschiebt man im Alphabet um einen bestimmten Abstand nach hinten; diesen Abstand haben Absender und Empfänger vorher vereinbart und halten ihn geheim. Ein solches Geheimnis heißt →Schlüssel. Den resultierenden Buchstaben schreibt man in den Chiffretext[2]:

2 Caesar soll zusätzlich die Buchstaben ins griechische Alphabet übertragen haben. Weil dabei kein Geheimnis (kein Schlüssel) benötigt wird, handelt es sich aber im kryptografischen Sinn nicht um eine Chiffre, sondern eine Codierung (hier im Sinne einer Geheim*schrift*).



Klartext-/	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Geheimtext-alphabet	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C

Den Chiffriervorgang kann man z.B. so aufschreiben:

Klartext m	K R Y P T O G R A F I E
Schlüssel k	3
Chiffretext c	N U B S W R J U D I L H

Entschlüsseln: Der legitime Empfänger kennt den Schlüssel, macht die Verschiebung buchstabenweise rückgängig und erhält wieder den Klartext.

Schwachstelle und Angriff: Es gibt überhaupt nur 26 Verschiebungen des Alphabets; wenn man das unverschobene Alphabet beiseite lässt, hat die Caesar-Chiffre nur 25 mögliche Schlüssel.[3] Man kann schlicht und einfach alle Schlüssel durchprobieren (in einer Klasse reicht es, wenn jeder Schüler eine Verschiebung testet) und bekommt früher oder später sinnvollen Klartext heraus. Diese Art Angriff heißt wegen des vollständigen Fehlens jedweder Raffinesse auch →brute-force-Angriff.

Schüler argumentieren hier (oder bei der Substitutionschiffre) oft, der Gegner könne diesen Angriff aber nur durchführen, wenn er schon weiß, dass es sich um eine Caesarchiffre handelt; so lange das verwendete System geheim ist, sei alles in Ordnung. Die Lehrperson sollte diese Gelegenheit unbedingt nutzen, das Kerckhoff'sche Prinzip zu erläutern.

Kerckhoff'sches Prinzip

Im Jahr 1883 formulierte Auguste Kerckhoff ein Grundprinzip der Kryptologie:[4]

> In einem guten Kryptosystem muss *nur der Schlüssel geheim* bleiben.

Wer eine Chiffre oder ein anderes Kryptosystem erfindet oder einsetzt, sollte sich also nie darauf verlassen, dass dessen zugrundeliegenden Ideen, Algorithmen und Implementierungen geheim bleiben. Diese Hoffnung ist meistens trügerisch. Im militärischen Bereich ist das zumindest für taktische Kommunikation auch offensichtlich, denn früher oder später wird der Gegner natürlich Chiffriergeräte erbeuten und einen dafür ausgebildeten Funker gefangen nehmen. Der Versuch, ein System durch das Verschleiern seiner Funktionsweise sicher zu machen, heißt „security by obscurity“ und gilt unter Kryptografen als unseriös.

Dass man sich für die Sicherheit eines Systems nicht auf Geheimhaltung stützen soll, heißt andererseits nicht, dass man es unbedingt publizieren muss. Diese Entscheidung hängt auch davon ab, ob man auf die sorgfältige Analyse durch ein aufmerksames Fachpublikum und eine entsprechende Rückmeldung hoffen kann. Auch sicherheitsrelevante Teile eines Betriebssystems stehen ja buchstäblich jedem Nutzer zur Verfügung, lassen sich also nicht wirklich geheim halten (auch wenn ohne Programmquelltext ihre Analyse äußerst mühsam ist). Das Kerckhoff'sche Prinzip wird daher als Argument zugunsten von Open-Source-Software (OSS) verwendet. Allerdings zeigt die 2014 als „Heartbleed“ bekannt gewordene Sicherheitslücke in

3Den Schlüssel 0 wollen Schüler intuitiv ausschließen, obwohl er zumindest für sehr kurze Klartexte (mit einem oder zwei Buchstaben) nicht unsicherer ist als andere. Dieser Überlegung gehen wir auf Seite 15 nach.

4Eine durchdachte und differenzierte Darstellung des Kerckhoff'schen Prinzips findet sich bei Bruce Schneier URL: *https://www.schneier.com/crypto-gram/archives/2002/0515.html* (abgerufen: Nov. 2016)

OpenSSL genau wie andere spektakuläre Fehler in OSS, dass die Fachwelt die Chance für eine gründliche Prüfung nicht immer nutzt.

Unstrittig ist aber die folgende Auslegung des Kerckhoff'schen Prinzips:

> Je weniger Geheimnisse ein Kryptosystem braucht, desto robuster ist es.

Substitutionschiffre (ca. 800 n. Chr.)

Es gilt nun, einen brute-force-Angriff wie auf die Caesar-Chiffre auszuschließen. Das gelingt mit der Substitutionschiffre. Die Verwendung dieser Chiffre wird Karl dem Großen und Hildegard von Bingen nachgesagt[5].

Verschlüsseln: Das Alphabet wird nicht mehr rotiert, sondern „verwürfelt“. Jedem Buchstaben des Alphabets wird ein anderer Buchstabe zugeordnet; diese Zuordnung haben Absender und Empfänger vorher vereinbart und halten sie geheim.

Klartext-/	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Geheimtext-Alphabet	B	L	I	E	S	P	U	N	Z	O	W	Q	R	A	G	Y	X	V	C	T	F	D	K	J	H	M

Die obere Zeile lautet natürlich immer gleich und ist damit nicht geheim. Der Schlüssel besteht also aus der zweiten Zeile dieser Tabelle[6]. Weil für den ganzen Klartext ein einziges Ersetzungsalphabet verwendet wird, heißt eine solche Chiffren auch →monoalphabetisch. Die Cäsar-Chiffre stellt einen Spezialfall der monoalphabetischen Substitution dar.

Den Chiffriervorgang kann man z.B. so aufschreiben:

Klartext m	K R Y P T O G R A F I E
Schlüssel k	Siehe zweite Zeile der obigen Tabelle
Chiffretext c	W V H Y T G U V B P Z S

Entschlüsseln: Der legitime Empfänger kennt den Schlüssel, macht die Zuordnung buchstabenweise rückgängig und erhält wieder den Klartext.

Schwachstelle und Angriff: Widersteht diese Chiffre jetzt einem brute-force-Angriff? Wie viele denkbare Schlüssel hat die Substitutionschiffre?

5Siehe Seite „Geschichte der Kryptographie“. URL:*https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Kryptographie* (abgerufen: November 2016) – verweist auf Friedrich L. Bauer: *Entzifferte Geheimnisse.* 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer, 2000, *ISBN 3-540-67931-6*

6Der Schlüssel im Beispiel wurde durch verdecktes Ziehen (ohne Zurücklegen) von Scrabble-Steinen erzeugt. Dabei wurde zuvor von jedem Buchstaben genau ein Stein in den Sack gelegt. Nun wird hier ein Buchstabe (das T) auf sich selbst abgebildet. Ist das schlimm? Sollte man es korrigieren? Den ganzen Schlüssel verwerfen? Oder wenigstens das T neu ziehen? Schüler plädieren oft für eine Korrektur, „weil der Schlüssel sonst nicht zufällig genug“ sei. Tatsächlich würde das Verwerfen vermeintlich „unzufälliger“ Schlüssel das System aber sogar schwächen, weil dann weniger Möglichkeiten bleiben. Und (Kerckhoff'sches Prinzip!) der Gegner weiß ja, ob wir Schlüssel verwerfen, die uns nicht gefallen, und wenn ja, welche. Der gleiche Fehler unterlief im zweiten Weltkrieg auch den Deutschen bei der Erzeugung von Enigma-Schlüsseln: Keine Walze durfte am nächsten Tag wieder an der gleichen Stelle stecken, weil das als „unzufällig“ angesehen wurde. Dieser Handhabungsfehler erleichterte (wie viele andere) den Briten auch tatsächlich den Angriff auf Enigma.

Der Schlüssel ist eine Permutation des Alphabets, es gibt also $26! \approx 4 \cdot 10^{26}$ verschiedene Schlüssel. Ausführlicher: Für den Schlüsselbuchstaben unter A gibt es 26 Möglichkeiten, einen Schlüsselbuchstaben auszuwählen, für den unter B nur noch 25 usw. Insgesamt gibt es also $26 \cdot 25 \cdot 24 \cdot \ldots \cdot 2 \cdot 1 = 26!$ verschiedene Schlüssel.

Ist 26! genug?

Für diese Abschätzung denken wir uns den Angriff auf einer extrem schnellen, aber frei erfundenen Maschine. Einen solchen Rechner kann auch die NSA nicht bauen. Wie lange kann der brute-force-Angriff damit höchstens brauchen, wenn diese Maschine...:

- mit Spezialprozessoren arbeitet, die in jedem Takt einen Schlüssel testen können (also in einem Takt feststellen, ob es der richtige Schlüssel ist oder nicht);
- mit 10 GHz Taktfrequenz läuft, also jeder Prozessor zehn Milliarden Takte pro Sekunde ausführt;
- 100 solcher Prozessoren in jedem Serverschrank stecken hat;
- aus 100 solcher Schränke im Rechenzentrum der NSA besteht?

Sekunden? Minuten? Jahrtausende?

Es dauert höchstens $26! \approx 4 \cdot 10^{26}$ Prozessortakte, bis die Maschine alle Schlüssel ausprobiert hat. Dafür braucht sie $\frac{4 \cdot 10^{26}}{10 \cdot 10^{9}(1/s) \cdot 100 \cdot 100} = 4 \cdot 10^{12} s \approx 120000$ Jahre, im Mittel also 60000 Jahre.

Dabei ist diese Maschine ja schon Utopie! Die Substitutionschiffre ist also immun gegen einen brute-force-Angriff. Lässt man die Schüler jetzt Schlussfolgerungen ziehen, bewerten viele sie als „unknackbar“. Das ist didaktisch gewollt, denn der gleiche Fehler ist auch in der Geschichte der Kryptografie immer wieder gemacht worden: „Mir fällt kein Angriff ein. Dann wird das System wohl sicher sein!“. Oder, wie es der Kryptologie-Experte Bruce Schneier ausdrückt: „Everybody can invent a cipher that he himself cannot break“.

Tatsächlich ist diese Chiffre sehr schwach.

Die Häufigkeiten der einzelnen Buchstaben bleiben auch nach der Substitutionschiffre erhalten. Abbildung 4 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Buchstaben in deutschen Texten; das E als mit Abstand häufigster Buchstabe der deutschen Sprache sticht deutlich heraus. Im Beispiel von Seite 8 würde man es im Chiffretext als häufiges S wiederfinden.

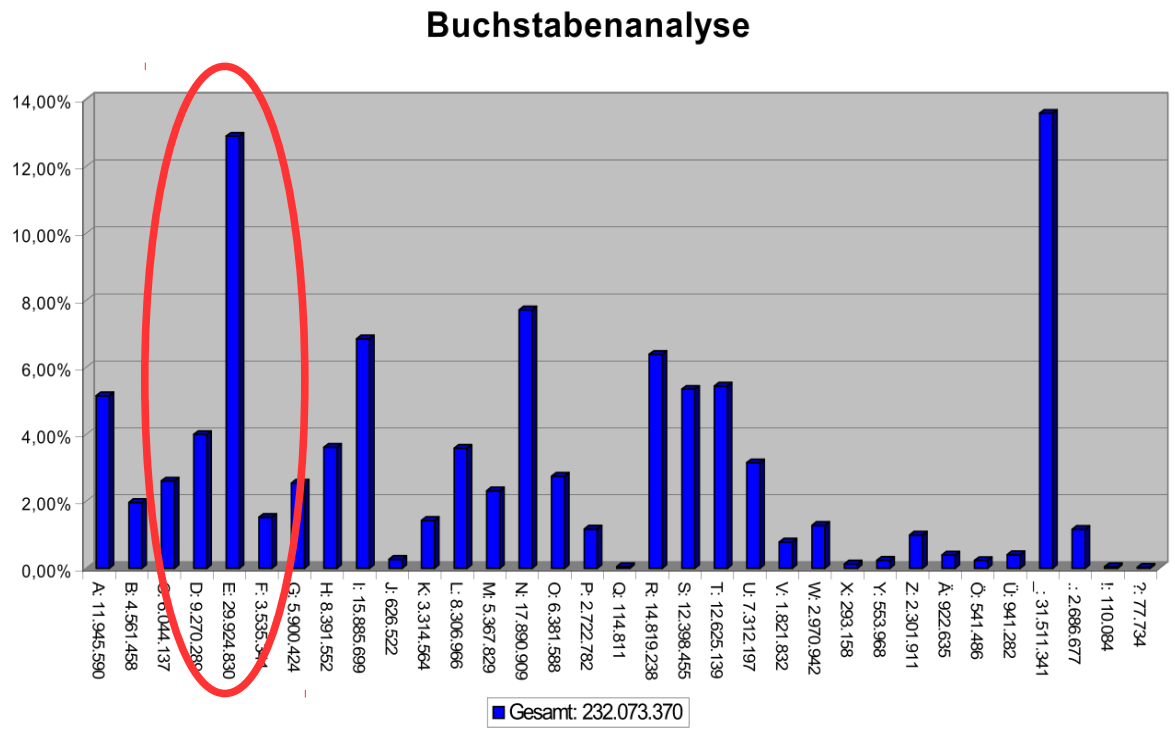


Abbildung 4: Buchstabenhäufigkeiten der deutschen Sprache, hier mit Umlauten, Leer- und Satzzeichen. Links sieht man deutlich das E, das im Deutschen stark herausstich und sich bei einer monoalphabetischen Chiffre sofort verrät. Die nächsthäufigeren Buchstaben I, N, R, S, T unterscheiden sich aber kaum noch; man gewinnt sie stattdessen durch die Analyse von Buchstabenpaaren und -tripeln. Rechts sind Umlaute, Satz- und das auffällige Leerzeichen. Dieses lässt man bei der Verschlüsselung aber oft einfach weg.

Bild „Alphabet Häufigkeit", Arbeitsgruppe EBUSS. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Alphabet_haufigkeit.svg (abgerufen: November 2016) [GNU-Lizenz für freie Dokumentation]

In Abbildung 4 fällt außerdem auch die Häufigkeit des Leerzeichens auf. Weil es nicht nur oft, sondern auch noch in charakteristischen Abständen auftritt, wäre es einfach zu identifizieren und würde dann sofort Rückschlüsse auf Wortlängen zulassen. Deswegen →normalisiert man bei allen klassischen Chiffren den Klartext vor dem Chiffrieren:

```
NAECHSTERANGRIFFZWEIUHRFUENFZEHN
```

Außer dem E sind dann zwar keine weiteren Einzelbuchstaben sofort aus dem Histogramm ersichtlich; aber auch Buchstabenpaare und -tripel (→Digramme und Trigramme) weisen in jeder Sprache charakteristische Häufigkeiten auf (Abb. 5). Falls der Chiffretext lang genug ist, erlaubt das einen einfachen und schnellen Angriff: Das schon bekannte E kommt in drei der häufigsten Trigramme vor und verrät damit auch die Chiffrebuchstaben zu N, I, D, U und R. Dazu kommen C und H. Wer etwas Übung mit Kreuzwort- und ähnlichen Rätseln hat, kann den Rest des Alphabets schnell erschließen.

Trigramm	Häufigkeit
ICH	1,15 %
EIN	1,08 %
UND	1,05 %
DER	0,97 %
NDE	0,83 %

Abbildung 5: Die häufigsten Trigramme der deutschen Sprache

Siehe Seite „N-Gramm". URL:https://de.wikipedia.org/wiki/N-Gramm (abgerufen: November 2016)

Es gibt viele Spezialfälle der Substitutionschiffre. Man kann den Schlüssel etwa aus einem leicht zu merkenden Satz konstruieren, der den Anfang des Schlüssels bildet:

Klartext-/	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Geheimtext-Alphabet	I	N	F	O	R	M	A	T	K	S	L	G	E	B	D	U	Z	Y	X	W	V	Q	P	J	H	C
	Schlüsselwort informatikistallgemeinbildung (aber jeder Buchstabe nur 1x)																restliche Buchstaben (von rechts aufgefüllt)									

Solche Varianten sind natürlich nie schwieriger zu brechen als der allgemeine Fall der monoalphabetischen Substitution, meistens wird der Angriff sogar deutlich erleichtert: In diesem Fall konzentrieren sich etwa die selteneren Buchstaben im hinteren Teil des Schlüsselalphabets, und wer den Absender der Nachricht kennt, kann plausible Vermutungen darüber anstellen, welche Wörter im Schlüssel wohl auftauchen werden.

Homophone Chiffre

Die homophone Chiffre ist ebenfalls monoalphabetisch; sie verschleiert aber die charakteristischen Buchstabenhäufigkeiten, indem sie für häufigere Buchstaben mehrere Ersetzungszeichen vorsieht, aus denen beim Verschlüsseln gewählt werden kann.

A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**	**K**	**L**	**M**	**N**	**O**	**P**	**Q**	**R**	**S**	**T**	**U**	**V**	**W**	**X**	**Y**	**Z**
88	42	60	87	32	76	94	21	57	20	29	38	65	01	82	9	18	27	90	53	07	43	52	61	70	79
97	51	69	96	41	85	03	30	66			47	74	10	91			36	99	62	16					
06		78	05	50		12	39	75			56	83	19	00			45	08	71	25					
15			14	59			48	84				92	28				54	17	80	34					
24			23	68				93					37				63	26	89						
33				77				02					46				72	35	98						
				86				11					55				81	44							
				95									64												
				04									73												
				13																					
				22																					
				31																					
				40																					
				49																					
				58																					
				67																					

Abbildung 6: Ersetzung der Zeichen bei einer homophonen Chiffre. Ein Ziffernpaar steht jeweils für ein Symbol des Schlüsselalphabets. Für das im Deutschen mit 16% sehr häufige E gibt es 16 mögliche Ersetzungen, für Q nur eine.

Bild „Homophone Chiffren“, Marcel Brätz. URL: https://www.kryptographiespielplatz.de (abgerufen: November 2016)

Für den Angriff reichen Häufigkeiten allein dann nicht mehr aus. Er gelingt aber wieder über Buchstabengruppen: Die Tatsache beispielsweise, dass im Deutschen auf Q fast immer U folgt, zeigt sich auch im Kryptotext darin, dass nach der 18 fast immer 07, 16, 25 und 34 stehen, und zwar jeweils gleich häufig. Solche Muster erlauben das Brechen der Chiffre.

Vigenère-Chiffre (16.-19. Jahrhundert)

Um die einfache Häufigkeitsanalyse abzuwehren, entstanden polyalphabetische Systeme wie die Vigenère-Chiffre – sie galt sogar 300 Jahre lang als unangreifbar. Hier verwendet man für aufeinanderfolgende Buchstaben jeweils verschiedene Alphabete, so dass sich die Häufigkeiten der Buchstaben im Geheimtext weitgehend nivellieren.

Verschlüsseln: Alice und Bob haben ein Schlüsselwort k vereinbart, k=TOM. Alice schreibt es wiederholend unter ihren Klartext:

Klartext m	A	U	S	K	L	A	R	T	E	X	T	W	I	R	D	C	H	I	F	F	R	E	T	E	X	T
Schlüssel k	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O

Nun wird das erste A mit dem Schlüsselalphabet T verschlüsselt (also wie mit einer Caesar-Scheibe in der Stellung „T unter A“[7]). Das U wird mit dem Alphabet O, das S mit M und das K wieder mit T verschlüsselt. Am einfachsten geht das mit dem Vigenère-Quadrat (vgl. Seite 23): Darin sucht man Schlüssel- bzw. Klartextbuchstabe an der linken bzw. oberen Achse und findet den zugehörigen Geheimtextbuchstaben im Inneren der Tabelle.

Geheimtext c	T	I	E	D	Z	M	K	H	Q	Q	H	I	B	F	P	V	V	U	Y	T	D	X	H	Q	Q	H

Die Häufigkeitsanalyse scheitert diesmal, weil jeder Klartextbuchstabe jetzt zu verschiedenen Geheimtextbuchstaben chiffriert wird (aus R beispielsweise wird K oder F oder D).

Entschlüsseln: Empfänger Bob schreibt den Schlüssel unter den Geheimtext und verfolgt die Buchstaben zurück: Er findet dabei (was vielen Schülern nicht gleich klar ist) den Geheimtextbuchstaben im Inneren der Tabelle, den Schlüssel auf der einen und den Klartext auf der anderen Achse.

Geheimtext c	T	I	E	D	Z	M	K	H	Q	Q	H	I	B	F	P	V	V	U	Y	T	D	X	H	Q	Q	H
Schlüssel k	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O	M	T	O
Klartext m	A	U	S	K	L	A	R	T	E	X	T	W	I	R	D	C	H	I	F	F	R	E	T	E	X	T

Schwachstelle und Angriff: Die Chiffre hat zwar genügend mögliche Schlüssel, und sie ebnet die sprachtypische Häufigkeitsverteilung ein. Der Angriff gelingt stattdessen durch die Periodizität. Eve ermittelt zuerst die Schlüssellänge L und führt dann L-mal einen Caesar-Angriff durch, nämlich einen für jeden Buchstaben des Schlüsselwortes. Für den Unterricht kann man diese Reihenfolge aber umkehren. Oft finden Schüler die entscheidenden Ideen dann selber.

1. Man nimmt der Einfachheit halber an, die Schlüssellänge sei bekannt: L=3. Wie attackierst man dann den Geheimtext c= `VRUJEGXEAVNGVBXEDXISILR`?

Bei Schlüssellänge 3 ist jeder dritte Buchstabe mit demselben Schlüsselalphabet chiffriert worden: das V so wie das folgende J, das X usw. Allgemein wurden die Buchstaben an Position 1, 4, 7, 10 usw. auf die gleiche Weise chiffriert. Man könnte sie „Gruppe 1“ nennen. Das gleiche gilt natürlich auch für Position 2, 5, 8, 11 usw. („Gruppe 2“). Innerhalb jeder der drei Gruppen liegt ja lediglich eine Caesar-Chiffre vor. Man kann also gruppenweise Häufigkeiten zählen und

7Methodischer Hinweis: Die Lehrperson muss nicht unbedingt formulieren, dass hier „wie mit Caesar“ gearbeitet wird. Manche Schüler bemerken das auch selbst, insbesondere wenn sie die Chiffre dann brechen sollen. Spätestens für den Angriff sollte diese Einsicht aber bei allen vorhanden sein.

auf diese Weise jede Gruppe einzeln angreifen. Zugunsten der Übersicht kann man die Gruppen getrennt aufschreiben:

Geheimtext c	V	R	U	J	E	G	X	E	A	V	N	G	V	B	X	E	D	X	I	S	I	L	R	
Gruppe 1	V			J			X			V			V			E			I			L		3x V
Gruppe 2		R			E			E			N			B			D			S			R	2x R 2x E
Gruppe 3			U			G			A			G			X			X			I			2x X

In Gruppe 1 ist das V sehr häufig, man vermutet dahinter ein E. Wenn das stimmt, müsste der erste Schlüsselbuchstabe R sein. Gruppe 3 führt analog auf T als Schlüssel. In Gruppe 2 sind E und R häufig, damit liegen A und N als Schlüsselbuchstabe am nächsten. Man kann einfach beide ausprobieren, oder man verwirft N, weil das auf den Wortanfang „EE“ führen würde, der im Deutschen normalerweise nicht vorkommt.

Der Schlüssel ist also RAT, der Klartext ERBSENGEHENNEBENDERSPUR.

2. Der nächste Schritt im Unterricht ist natürlich die Ermittlung der Schlüssellänge, die der Angreifer ja eigentlich noch nicht kennt. Für die Schule eignen sich Kasiski-Test, Autokorrelation und der partielle brute-force-Angriff.

Kasiski-Test zur Bestimmung der Schlüssellänge:

Im folgenden Geheimtext fällt bei genauem Hinsehen die Folge HQQH auf:

Geheimtext c	T	I	E	D	Z	M	K	H	Q	Q	H	I	B	F	P	V	V	U	Y	T	D	X	H	Q	Q	H
Startposition								8															23			

Auch ohne Kenntnis des Klartextes liegt die Vermutung nahe, dass hier das gleiche Textfragment mehrfach verschlüsselt wurde, und zwar beide Male mit dem gleichen Teil des Schlüssels. HQQH tritt ab Position 8 und ein zweites Mal ab Position 23 auf. Wenn die Vermutung stimmt, muss der Abstand $23-8=15=3\cdot 5$ zwischen den Fragmenten also ein Vielfaches der Schlüssellänge sein, d.h. man vermutet L=3 oder L=5 oder L=15. Wenn andere Zeichenfolgen ebenfalls mehrfach auftreten, kann man auf diese Weise die Schlüssellänge schnell eingrenzen – und mit dem oben beschrieben Angriff weitermachen.

Das obige Beispiel wurde natürlich passend vorbereitet, aber in längeren Texten passiert das tatsächlich auch von selbst, vor allem mit häufigen →Di- und →Trigrammen.

Autokorrelation zur Bestimmung der Schlüssellänge:

Die Autokorrelationsmethode lässt sich besonders gut automatisieren. „Von Hand“ ist sie zwar etwas mühsamer als der Kasiski-Test; dafür funktioniert sie aber auch bei Texten, die gar keine sich wiederholenden Buchstabenfolgen enthalten.

Die Vigenère-Chiffre ebnet zwar die Häufigkeitsunterschiede *zwischen* den Gruppen ein, aber *innerhalb* einer Gruppe sind immer die gleichen Buchstaben häufig (bzw. selten). Das nutzt man aus, indem man den Geheimtext buchstabenweise verschiebt und seine Übereinstimmungen mit sich selber zählt. Wenn nach der richtigen Verschiebung (nämlich um genau eine Schlüssellänge) alle Buchstaben wieder mit denen ihrer eigenen Gruppe zusammentreffen, fällt das bei der Zählung sofort auf:

↓ Verschiebungsweite																Anzahl der Übereinstimmungen ↓																			
0		**W**	**E**	**K**	**Z**	**E**	**G**	**S**	**E**	**K**	**V**	**I**	**M**	**V**	**N**	**X**	**I**	**H**	**X**	**S**	**L**	**B**	**T**	**H**	**X**	**W**	**R**	**X**	**L**	**D**	**X**					
1			W	E	K	Z	E	G	S	E	K	V	I	M	V	N	X	I	H	X	S	L	B	T	H	X	W	R	X	L	D	X				**0**
2				W	E	K	Z	E	G	S	E	K	V	I	M	V	N	X	I	H	X	S	L	B	T	H	X	W	R	X	L	D	X			**0**
3					W	**E**	K	Z	**E**	G	S	E	K	**V**	I	M	V	N	**X**	I	H	X	S	L	B	T	H	**X**	W	R	**X**	L	D	X			**6**
4						W	E	K	Z	E	G	S	E	K	V	I	M	V	N	X	I	H	X	S	L	B	T	H	X	W	R	X	L	D	X		**0**

Die sechs Treffer bei Verschiebung drei stechen hier deutlich heraus, die nächsten Maxima treten erwartungsgemäß bei Verschiebung 6 und 9 auf (mit nachlassender Tendenz wegen abnehmender Überlappung der beiden Texte): Die Schlüssellänge ist offensichtlich 3. Diese Zählung kann man Schüler sehr gut mit Papierstreifen machen lassen. Danach können viele auch mit eigenen Worten begründen, warum eine Autokorrelation die Schlüssellänge aufdeckt.

Partieller brute-force-Angriff zur Bestimmung der Schlüssellänge:

Da Vigenère bei bekannter Schlüssellänge so einfach zu brechen ist, kann man den Angriff auch einfach mit *allen* möglichen Schlüssellängen durchführen. Sobald man die richtige Länge rät, fällt das anhand der statistischen Eigenschaften der Buchstabengruppen sofort auf. Es handelt sich also um einen brute-force-Angriff nur auf einen Teil des Schlüssels. Das Vorgehen ist deswegen interessant, weil ein vollständiger brute-force-Angriff auf den gesamten Schlüssel zu aufwändig wäre; der zweiteilige Angriff (nämlich die Länge des Schlüssels per brute-force, danach seinen Inhalt auf die oben besprochene Weise zu ermitteln) ist hingegen absolut realistisch.[8] Auch dieser Angriff ist übrigens leicht zu automatisieren.

Die Vigenère-Chiffre ist damit vollständig gebrochen. Geschichtlich markieren die Angriffe auf Vigenère den Wandel der Kryptologie (vor allem der Kryptoanalyse) von einer linguistisch zu einer mathematisch geprägten Disziplin. Der amerikanische Kryptologe William Frederick Friedman entwarf um 1920 sogar einen Angriff auf die Schlüssellänge, in den (neben statistischen Eigenschaften der Klartextsprache) nur die Auszählung der Buchstabenhäufigkeiten im Chiffretext eingeht[9].

Transpositionschiffre

Bei Transpositionschiffren bleiben die Zeichen einer Botschaft unverändert erhalten, werden stattdessen aber umsortiert. Diese Chiffren bilden damit eine zweite Klasse neben den Substitutionen, bei denen jedes Klartextzeichen am Platz bleibt und dort durch ein anderes ersetzt („substituiert") wird.[10]

8Durch ein vergleichbares Vorgehen gelang dem polnischen Team um Marian Rejewski schon Mitte der 30er Jahre ein Einbruch in die deutsche Chiffre Enigma: Auch Enigma hatte einen zweiteiligen Schlüssel, und es gelang Rejewski, die beiden Teile getrennt anzugreifen. Für den ersten Teil ließ Rejewski bestimmte Eigenschaften von ca. 100000 Einstellungen vorausberechnen (das dauerte etwa ein Jahr), der zweite war ein Spezialfall einer Substitutionschiffre. Rejewski legte damit den Grundstein für die späteren britischen Erfolge gegen Enigma.

9Siehe Seite „Friedman-Test". URL: *https://de.wikipedia.org/wiki/Friedman-Test* (abgerufen: November 2016)

10 Siehe Seite „Transposition (Kryptographie)". URL: *https://de.wikipedia.org/wiki/Transposition_(Kryptographie*) (abgerufen: November 2016)

Ein einfaches Beispiel hierzu ist die „Gartenzauntransposition“:

Klartext	I	N	F	O	R	M	A	T	I	K
Transposition	I		F		R		A		I	
		N		O		M		T		K
Chiffretext	I	F	R	A	I	N	O	M	T	K

Beispiele für diese Verschlüsselungsklasse sind Skytale, Fleißnersche Schablone oder auch →ADFGX.

One-Time-Pad (OTP, ca. 1880)

Beim hier vorgeschlagenen Unterrichtsgang markiert das One-Time-Pad einen charmanten Wendepunkt in der Unterrichtseinheit: Nachdem die Schüler sich gerade daran gewöhnt haben, dass nun mal jede Chiffre früher oder später gebrochen wird, halten sie die „unknackbare“ für ein Hirngespinst. Unknackbare Chiffren gibt es aber.

Für die Begründung dieser bemerkenswerten Eigenschaft verwenden wir den Begriff „Information“ wie in der Informationstheorie, aber auf informelle Weise und qualitativ: Er bedeutet hier „Ausschluss von Möglichkeiten“. Eine Chiffre nennen wir dann „perfekt sicher“, wenn Eve durch das Abfangen der Nachricht keinerlei Information gewinnen kann.

Beispiel: Die Aussage „Jemand in Deutschland hat letzten Mittwoch im Lotto gewonnen.“ lässt etwa 80 Mio. Möglichkeiten, wer das sein könnte. Jede Einschränkung dieser Möglichkeiten betrachten wir als Informationszuwachs.

- Die Aussage „Rüdiger Obermüller aus Offenburg war's“ schränkt die Auswahl auf eine einzige Person ein – mehr Information kann man nicht bekommen.
- Die Aussage „Die Gewinnerin ist weiblich, über 80 Jahre alt und hat mindestens Schuhgröße 44“ schränkt die Anzahl der Kandidat(inn)en drastisch ein – der Informationsgewinn ist immer noch sehr groß.
- Die Aussage „Die Person ist älter als 9 Jahre“ verringert den Kreis der möglichen Gewinner um immerhin 8.000.000 Menschen und stellt damit einen geringen Informationsgewinn dar.
- Die Aussage „Ich war es leider nicht“ schließt nur eine Person aus, 79999999 bleiben übrig. Der Informationsgewinn ist winzig.

Betrachten wir die Substitutionschiffre noch einmal aus dieser Perspektive und beschränken uns auf Klartexte mit elf Buchstaben. Wenn wir wissen, dass es sich um eine Substitutionschiffre handelt (wir erinnern uns ans Kerckhoff'sche Prinzip: Über dieses Wissen verfügt der Angreifer immer) – hilft uns der Geheimtext dann, Möglichkeiten (also Klartexte) auszuschließen? Anders gefragt: Welcher elfbuchstabige Klartext ist hier *nicht* verschlüsselt worden?

mit Substitution chiffriert	O	N	X	U	D	S	J	Y	O	U	D	
Ist das ein möglicher Klartext?	W	E	I	H	N	A	C	H	T	E	N	Nein: Es gibt einen Konflikt zwischen O≡W und O≡T (und noch weitere)

Auch die Klartexte `FRUEHSTUECK`, `KRYPTOGRAPH`, `CHIFFRIEREN` oder `INTELLIGENT` kommen wegen ähnlicher Konflikte nicht in Frage. Der Angreifer kann viele Klartexte ausschließen, nachdem er den Geheimtext abgefangen hat. Vielleicht kann er sogar den echten Klartext

ermitteln. Jedenfalls verschafft die Kenntnis des Geheimtextes ihm einen gewissen Informationsgewinn im oben beschriebenen Sinn. Entscheidend ist, dass dieser Zugewinn durch das Abfangen der Nachricht entsteht.

Auch für die Caesar-Chiffre konstruiert man leicht einen Geheimtext und sieht, dass man mit seiner Hilfe Klartexte ausschließen kann. Bei Caesar reicht dafür schon eine kurze Nachricht mit nur wenigen Buchstaben – deswegen ist Caesar ja so schwach.

Eine perfekt sichere Chiffre muss also folgende Eigenschaft haben: Auch *nachdem* Eve den Geheimtext abgefangen hat, kommt für sie immer noch *jeder* Klartext in Frage[11] (der passende Länge hat).

Das One-Time-Pad hat tatsächlich diese Eigenschaft.

Schlüsselerzeugung: Der Schlüssel muss

1. absolut zufällig gewählt werden,
2. mindestens so lang sein wie die Nachricht
3. und natürlich geheim bleiben.

Im Unterricht kann man OTP-Schlüssel z.B. mit einem Alphabet aus Scrabble-Steinen erzeugen, die man verdeckt aus einer Tasche zieht. Man zieht mindestens so viele Buchstaben, wie man später chiffrieren möchte.

Verschlüsseln: Genau wie bei Vigenère schreibt man Schlüssel und Klartext untereinander und benutzt das Vigenère-Verfahren. Namensgebend ist insbesondere die Tatsache, dass der so erzeugte Schlüssel auch...

Schlüssel k	F	K	H	M	F	Q	Z	D	G	R
Nachricht m	B	I	L	D	U	N	G			
Chiffretext c	G	S	S	P	Z	D	F			

4. nur ein einziges Mal verwendet werden darf.

Den nicht benutzten Teil des Schlüssels kann man für die nächste Nachricht aufheben oder wegwerfen. Den benutzten Teil *muss* man wegwerfen.

Entschlüsseln: Genau wie bei Vigenère schreibt man Schlüssel und Geheimtext untereinander und benutzt die Vigenère-Tabelle.

Warum ist OTP nun perfekt sicher?

Auch mit dem Wissen c=GSSPZDF kann Eve keinen einzigen (siebenbuchstabigen) Klartext ausschließen. Anders gesagt: Sie kann zu jedem hypothetischen Klartext m' auch einen Schlüssel k' angeben, der aus diesem m' den Chiffretext c=GSSPZDF gemacht hätte, und dieses k' ist genauso wahrscheinlich wie alle anderen auch. Sie muss also alle m' nach wie vor in Betracht ziehen. Eve erfährt daher nichts Neues über m (was sie nicht auch schon vor dem Abfangen der Nachricht wusste).

Aber der Superrechner der NSA kann es doch bestimmt mit brute force?! Brute force liefert eine Liste aller Klartexte (mit passender Länge) – und kein einziger sticht irgendwie heraus. Man hat nichts gewonnen. Es gibt eben keine Angriffe auf OTP, nicht heute und nicht morgen. Sie können auch nicht erfunden werden. Weder schnellere Maschinen noch Quantencomputer können OTP angreifen. Wenn die Information im Chiffretext gar nicht drinsteckt – dann kann auch kein Verfahren sie herausholen.

11 Dabei darf Eve durchaus wissen, dass bestimmte Nachrichten vorkommen können und andere nicht, oder dass ANGRIFFIMMORGENGRAUEN im Moment plausibler ist als HABLUSTAUFPIZZAFUNGHI – aber das wusste sie ja auch schon vor dem Abfangen der Nachricht. Entscheidend ist, dass sie *danach* keine *zusätzliche* Information hat.

OTP ist perfekt sicher. Prima! Dann waren ja alle kryptografischen Probleme schon 1880 gelöst. Aber woran arbeiten Kryptografen dann überhaupt? OTP ist zwar sehr einfach und sehr sicher, wirft aber in der praktischen Anwendung massive Probleme auf.

Problem des →Schlüsselaustauschs: Wenn man genau so viel Schlüsselmaterial braucht, wie auch die Nachricht lang ist, und der Schlüssel auf einem sicheren Weg übermittelt werden muss – dann könnte man darüber ja auch gleich die Nachricht selber verschicken.

Problem der Schlüsselverwaltung: Das komplette OTP-Schlüsselmaterial muss nicht nur erzeugt und übergeben, sondern anschließend bis zur Verwendung auch sicher aufbewahrt werden. Das ist in vielen Szenarien („Geheimagent in Feindesland") gar nicht machbar.

Auch die mangelnde Robustheit von OTP ist problematisch: Es bietet perfekte Sicherheit – bei richtiger Durchführung. Aber schon bei kleinsten Fehlern in der Handhabung stürzt OTP wie ein Kartenhaus in sich zusammen. Das ist im Alltag gefährlich, und zwar nicht nur wenn Laien die Chiffre einsetzen.

Obwohl das One-Time-Pad für die meisten Anwendungen unpraktisch ist, wurde und wird es tatsächlich eingesetzt, wenn einerseits Geld keine Rolle spielt und andererseits Schlüsselverteilung und -verwaltung logistisch machbar sind. Das war beispielsweise beim „Heißen Draht" zwischen Moskau und Washington der Fall: Diese Fernschreibverbindung sollte im Kalten Krieg verhindern, dass aufgrund von Missverständnissen Raketen starten. Auch im Zweiten Weltkrieg war die Weitergabe gebrochener Enigma-Funksprüche von Bletchley Park nach London zwar sehr eilig; noch wichtiger war den Briten aber die *absolute* Geheimhaltung ihres Einbruchs in Enigma. Ein OTP leistet beides.

Beide Szenarien (Kalter Krieg und Bletchley) erlauben den Einsatz von OTP, weil der vorherige Austausch ausreichender Mengen Schlüsselmaterial „auf Vorrat" ohne weiteres durchführbar war. In beiden Fällen vereinfacht auch die Punkt-zu-Punkt-Verbindung die Schlüsselverteilung (im Vergleich zu einem Kommunikations*netz*).

Viele andere Kryptosysteme ahmen die Idee nach, indem sie aus einem kurzen Schlüssel einen langen, unregelmäßigen, aber eben nur pseudozufälligen „Schlüsselstrom" erzeugen, mit dem dann der Klartext chiffriert wird; auch Enigma ist dafür ein Beispiel. Die Sicherheit eines One-Time-Pad erreicht man damit aber nicht.

Enigma

Die Chiffriermaschine Enigma[12] wurde von den Zwanzigerjahren bis 1945 vom deutschen Militär verwendet. Trotz regelmäßiger Verbesserungen vor allem während des Krieges gelangen den Alliierten immer wieder Einbrüche in die Chiffre; letztlich konnten deutsche Enigma-Funksprüche nahezu kontinuierlich entziffert werden, was den Krieg vermutlich um Jahre verkürzt hat.

Obwohl das Thema sehr spannend ist und im Unterricht auch gut ankommt, wird hier auf Details verzichtet. Eine ausgezeichnete Darstellung findet sich bei swisseduc.ch[13], auch sehr gute Simulatoren sind leicht verfügbar[14].

12 Siehe Seite „*Enigma_(Maschine*)". URL: *https://de.wikipedia.org/wiki/Enigma_(Maschine*) (abgerufen: November 2016)

13 Siehe Seite „Einigma Dokumentation". URL: *http://www.swisseduc.ch/informatik/daten/kryptologie_geschichte /docs/enigma_dokumentation.pdf* (abgerufen: November 2016)

14 Siehe Seite „Universal Enigma". URL: *https://people.physik.hu-berlin.de/~palloks/js/enigma/enigma-u_v20.html*
Siehe Seite „Enigmasimulator 7.0". URL: *http://users.telenet.be/d.rijmenants/en/enigmasim.htm*
(abgerufen: November 2016)

Moderne symmetrische Chiffren: DES, AES und ihre Anwendung

Nach der Einführung asymmetrischer Verfahren (siehe unten) entsteht oft die Fehlvorstellung, symmetrische Verfahren seien nun überflüssig oder zu schwach, asymmetrische hingegen neu und sicher. Ganz im Gegenteil sind starke symmetrische Verfahren auch bei sehr modernen Anwendungen wie etwa SSL/TLS prinzipiell unverzichtbar.

Symmetrische Chiffren sind auch in aktuellen Anwendungen weit verbreitet. Für Clouds oder verschlüsselte Container auf eigenen Speichermedien ist beispielsweise kein aufwändiger Schlüsselaustausch nötig, wenn nur eine Person oder eine kleine Gruppe darauf zugreift.

Symmetrische Chiffren wie DES und AES werden für viele moderne Anwendungen eingesetzt. Das Portal inf-schule.de bietet hierzu (wie für viele weitere Themen) Material und Aufgaben.

INF-SCHULE.DE: *AES – EIN MODERNDES SYMMETRISCHES CHIFFRIERVERFAHREN.*

Didaktischer Hinweis: Es bietet sich an, eine praktische Einheit etwa mit VeraCrypt anzuschließen. Derzeit (Frühjahr 2016) ist VeraCrypt das einzige Kryptocontainer-Werkzeug, das Open Source ist, als hinreichend sicher gilt und unter Linux, MacOS und Windows gleichermaßen komfortabel funktioniert. Daran können Schüler ganz konkret erleben, wie Kryptografie mit wenig Aufwand und geringer Einarbeitung ihren Alltag erleichtert. Da sich die Tools und ihre Handhabung immer wieder ändern, wird hier auf fertige Arbeitsblätter und Ablaufbeschreibungen verzichtet. Unter *http://lehrerfortbildung-bw.de/werkstatt/sicherheit/stickcrypt/vc/* können Sie derzeit Unterlagen zu VeraCrypt abrufen.

Aus demselben Grund sollte auch bei einer praktischen Einheit Wert darauf gelegt werden, die kryptografischen Fachkonzepte wiederzuerkennen und zu benennen: Warum ist für diese Anwendung eine symmetrische Chiffre sinnvoll? Warum ein starkes Passwort? Warum muss man beim Schlüsselerzeugen in VeraCrypt „so komisch an der Maus wackeln“? Die Erzeugung der Zufallszahlen aus der Mausbewegung ist eine gute Gelegenheit, über vom Rechner erzeugte Pseudozufallszahlen und ihren Einfluss auf die Sicherheit eines Kryptosystems zu sprechen.

Asymmetrische Chiffren

Symmetrische Chiffren lösen nicht alle Probleme

Alle bisher besprochenen Chiffren sind →symmetrisch in dem Sinne, dass Alice und Bob im Besitz des gleichen Geheimnisses (eben ihres gemeinsamen Schlüssels) sein müssen. Diese Symmetrie verursacht zwei zentrale Probleme, die allen diesen Chiffren gemeinsam sind:

1. Problem der Schlüsselvereinbarung: Um ihren gemeinsamen Schlüssel zu vereinbaren, müssen Alice und Bob sich entweder persönlich treffen, oder aber einen sicheren Kommunikationskanal nutzen. Beides kann schwierig oder unmöglich sein (deswegen brauchen sie ja eine Chiffre).
2. Problem der Schlüsselverwaltung: Nach erfolgreicher Schlüsselvereinbarung mit Bob muss Alice die Prozedur nicht nur mit jedem Kommunikationspartner wiederholen: Sie muss diese vielen Schlüssel zukünftig auch geheim halten.

Die Grundidee der asymmetrischen Chiffren ist die Verwendung von zwei Schlüsseln: Einen kann man öffentlich über einen unsicheren Kanal verschicken. Den anderen privaten Schlüssel muss man geheim halten.

Der wichtigste Vertreter dieser Gattung ist RSA (nach den Erfindern Rivest, Shamir und Adleman). Hier ist es möglich, sowohl mit dem öffentlichen Schlüssel eine Nachricht zu chiffrieren und dann mit dem privaten zu dechiffrieren als auch den umgekehrten Weg zu gehen.

Vertraulichkeit sicherstellen:

Wird eine Nachricht mit den öffentlichen Schlüssel des Empfängers verschlüsselt, kann nur der Empfänger (das ist der Besitzer des privaten Schlüssels) diese Nachricht entschlüsseln. Es ist die Vertraulichkeit der Nachricht sichergestellt.

Authentifizieren:

Wird eine Nachricht mit dem privaten Schlüssel des Absenders chiffriert, kann jeder die Nachricht mit Hilfe des öffentlichen Schlüssels lesen. Aber sie kann nur von dem angegeben Absender stammen. Die Authentizität der Nachricht ist sichergestellt.

Das Verfahren beruht auf der Anwendung aufwändiger mathematischer Verfahren, die hier nicht näher erläutert werden sollen.

Angriff:

Asymmetrische Verfahren haben allerdings eine große Schwachstelle: Den →Man-in-the-middle-Angriff auf den Schlüsselaustausch. Wird der öffentlich verschickte Schlüssel von Mallory ausgetauscht und durch seinen eigenen öffentlichen Schlüssel ersetzt, bricht die ganze Sicherheit zusammen. Durch ein Zertifizierungssystem versucht man diese Problematik zu lösen. Öffentliche Schlüssel werden von eine Zertifizierungsstelle (z.B. Verisign) authentifiziert. Leider führt der Faktor Mensch hier in der Praxis zu großen Sicherheitslücken.

Interessant ist auch die Fragestellung, ob nicht ein Zusammenhang zwischen öffentlichem und privatem Schlüssel bestehen muss, so dass man aus dem öffentlichen den privaten berechnen kann. Ja, diesen Zusammenhang gibt es. Im Prinzip kann man den privaten Schlüssel errechnen, allerdings ist der dafür benötigte Zeitaufwand so groß, dass er in der Praxis keine Gefahr darstellt. Aufgrund immer schnellerer Rechner müssen allerdings immer größere Schlüssel verwendet werden, um diesen Angriff zu verhindern.

Im Moment (Stand 2016) gelten 1024-Bit-RSA-Schlüssel als nicht mehr zukunftssicher und sollten ausgetauscht werden. 2048 Bit sind heute (2016) noch gut genug, langlebige Schlüssel dürfen 4096 Bit lang sein. Diese Abwägung ist nicht ganz einfach, weil nicht alle kryptografischen Errungenschaften öffentlich bekannt sind. Die NSA beispielsweise könnte über spezielle Computer, bessere Algorithmen oder sogar geheim gehaltene mathematische Durchbrüche verfügen. Die Enthüllungen von Snowden legen allerdings nahe, dass grundlegende kryptografische Verfahren (auch RSA) auch gegen Angriffe der NSA immun sind. Schwächen bestehen eher in Protokollen und Implementierungen.

Allerdings sollte man den Schülern auch klar machen, dass ein Angriff auf Browser oder Betriebssystem ihres PC immer noch unvergleichlich einfacher ist als einer auf RSA-1024. Das gilt auch für sorgfältig konfigurierte und gepflegte Systeme, und für Smartphones sowieso. Immerhin ist die Kryptografie definitiv nicht die schwächste Stelle.

Glossar

Eine Auswahl der **wichtigsten kryptologischen Fachbegriffe ist fett gesetzt**.

Abstreitbar: ist eine Nachricht, wenn dem Verfasser nicht nachgewiesen werden kann, dass er sie geschrieben hat. Wenn nicht einmal die Teilnahme am Gespräch nachweisbar ist, spricht man von starker Abstreitbarkeit.

ADFGVX: Substitutions- und Transpositionschiffre der Reichswehr von 1918. Wurde von einem Franzosen sehr schnell gebrochen; die gewonnenen Informationen kamen gerade noch rechtzeitig und vereitelten einen Durchbruch der Deutschen nach Paris[15].

AES: (Advanced Encryption Standard) ist der heute übliche Name der Rijndael-Chiffre: eine moderne →symmetrische Chiffre, die im Jahr 2000 als Sieger aus einem Wettbewerb um die Nachfolge des alternden DES hervorging. Sie zeichnet sich unter anderem durch wählbare Schlüssellängen und wirksame Hardwarebeschleunigung aus.

Alice, Bob: Alice, Bob, Eve und Mallory spielen in der Kryptografie traditionell die drei Hauptrollen:
Alice und Bob kommunizieren;
„evil“ oder „eavesdropper" Eve versucht passiv mitzulesen;
„malicious“ Mallory versucht die Kommunikation zu manipulieren.

Asymmetrische Verfahren:
zeichnen sich dadurch aus, dass jeder nur ein einziges Geheimnis besitzt: seinen privaten Schlüssel, den er niemals aus der Hand gibt. Den dazu passenden öffentlichen Schlüssel hingegen kann er bedenkenlos jedem zeigen. Bekanntester Vertreter ist RSA.

Angriff: Angriff auf ein Kryptosystem nennt man die Umgehung des jeweiligen Schutzzweckes. Chiffren beispielsweise greift man an, um die Geheimhaltung zu unterlaufen. Man kann dabei zwischen Angriffen auf einzelne Geheimtexte und Angriffen auf die Chiffre unterscheiden: Im zweiten Fall gewinnt man nicht nur *einen* Klartext, sondern ein Verfahren für alle (oder viele) damit chiffrierte Nachrichten.
Dementsprechend greift man Signaturen an, um Authentizität und/oder Integrität zu unterlaufen.

15 Siehe Seite „ADFGX“. URL: *https://de.wikipedia.org/wiki/ADFGX#Entzifferung* (abgerufen: November 2016)

Authentizität: Man weiß sicher, von wem die Nachricht stammt.

Chiffre: Verfahren zur Verschlüsselung

Chiffretext: chiffrierter Text (synonym: Geheimtext)

Codierung: Darstellung von Daten in einer bestimmten Form. Geläufig sind Binär-, ASCII-, Bitmap- oder mp3-Codierung für verschiedene Arten von Daten. Obwohl Chiffren genau genommen auch Codierungen sind (mit denen ja der Klartext auf eine bestimmte Weise dargestellt wird), sollte man aus didaktischen Gründen die Begriffe Codierung und Chiffre sauber trennen.

Digramm: Buchstabenpaare wie EN, ER, ST, IN sind im Deutschen häufiger als VQ, XE oder TK. Die Analyse von Chiffretext-Digrammen erlaubt einen einfachen Angriff auf monoalphabetische Chiffren.

Geheimhaltung: Außer den legitimen Teilnehmern kann niemand den Inhalt erfahren.

Kerckhoff'sches Prinzip: Die Sicherheit eines Kryptosystems darf ausschließlich auf der Geheimhaltung des Schlüssels beruhen, nicht auf der des Verfahrens: Das wird dem Gegner nämlich früher oder später sowieso bekannt. Ein kompromittierter Schlüssel ist dann leichter auszutauschen als eine unbrauchbar gewordene Chiffre.
Anders formuliert: Je weniger Geheimnisse ein Kryptosystem braucht, desto sicherer ist es.

Klartext: unverschlüsselte Nachricht.

Kryptoanalyse nennt man sowohl den Angriff auf ein Kryptosystem, als auch das Teilgebiet der Kryptografie, das diese Angriffe behandelt.

Kryptografie behandelt streng genommen nur das Chiffrieren von Nachrichten. Auch in diesem Skript wird das Wort aber im Sinne eines Sammelbegriffs verwendet.

Kryptologie wird oft als Oberbegriff für Kryptografie und Kryptoanalyse verwendet.

Kryptosystem kann als Sammelbegriff für Chiffre, Signaturverfahren und andere kryptografische Verfahren benutzt werden. Manchmal sind damit aber alle Systeme gemeint, die mit Kryptografie zu tun haben.

Integrität: Die Nachricht ist seit dem Abschicken nicht verändert worden.

Man-in-the-middle-Angriff: Eve oder Mallory „sitzt“ zwischen Alice und Bob und manipuliert unbemerkt die Kommunikation so, dass die beiden mit ihr reden, statt miteinander. Insbesondere wenn Eve ein Schlüsselpaar erstellt, das aussieht wie eines von Alice, und den öffentlichen Teil davon Bob unterschiebt, kann sie fortan Bob gegenüber als Alice auftreten.

Monoalphabetisch: Wenn ein Buchstabe des Klartextes stets durch denselben Buchstaben des Schlüsselalphabets ersetzt wird, spricht man von einer monoalphabetischen Chiffre. Gegenteil: →polyalphabetisch

Nachricht: Aus didaktischen Gründen wurde das Wort in diesem Skript vermieden, weil es leider offenlässt, ob Klar- oder Geheimtext gemeint ist. Im Gespräch mit Schülern sollte man es nur verwenden, wenn es im Kontext eindeutig ist.

Normalisierung: Vor dem Chiffrieren entfernt man aus dem Klartext alle Leerzeichen, Interpunktion, Ziffern sowie Umlaute und nivelliert Groß- und Kleinschreibung: NAECHSTERANGRIFFZWEIUHRFUENFZEHN
Das ist bei klassischen Chiffren erforderlich, damit Wort- und Satzlängen aus dem Chiffretext nicht zu leicht ermittelt werden können.

Polyalphabetisch: Bei einer polyalphabetischen Verschlüsselung kann ein Buchstabe des Klartextes durch verschiedene Buchstaben des Schlüsselalphabets ersetzt werden. Die Vigenère-Chiffre ist ein Beispiel für eine polyalphabetische Substitutionschiffre. Gegenteil: →monoalphabetisch

Schlüssel: Bei →symmetrischen Chiffren ist der Schlüssel das gemeinsame Geheimnis von Absender und Empfänger.
Bei →asymmetrischen Chiffren besteht jeder Schlüssel aus einem geheimen (privaten) und einem öffentlichen Teil.

Signaturen beweisen, dass ein Klartext wirklich vom behaupteten Autor ist. Sie garantieren also →Authentizität und →Integrität des Textes. Signaturverfahren sind immer →asymmetrisch: Mit dem privaten Schlüssel wird signiert (damit die Signatur nicht abstreitbar ist), mit dem öffentlichen verifiziert (so dass jeder sie prüfen kann).

Symmetrisch nennt man Kryptoverfahren, bei denen schon vor der Kommunikation beide Partner den gleichen, gemeinsamen, geheimen Schlüssel haben müssen.

Trigramm: Buchstabentripel. Im Deutschen sind etwa EIN, DER oder SCH auffällig häufig. Siehe Digramm.

Vigenère-Quadrat

Schlüssel \ Klartext	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
A	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
B	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A
C	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B
D	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C
E	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D
F	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E
G	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F
H	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G
I	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H
J	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I
K	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
L	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
M	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
N	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
O	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
P	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Q	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
R	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
S	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
T	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
U	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
V	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
W	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
X	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
Y	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
Z	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y