Zur Optimierung der Kommunikation von Patienten mit Locked-In-Syndrom

Nils Dagsson Moskopp

10. April 2008

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Dokuments wird erörtert, inwiefern sich die Geschwindigkeit der Kommunikation mit vom „Locked-In-Syndrom“ durch Verwendung zweidimensionaler Buchstabentafeln erhöhen lässt. Für die beiden untersuchten Protokolle werden zunächst allgemeine, vom verwendeten Alphabet unabhängige Aussagen getroffen. Die erörterten Protokolle werden dann beispielhaft auf einen Text angewandt.

Inhaltsverzeichnis

1 Fragestellung und Motivation **2**

2 Modellierung **2**

2.1 Einführung 2

2.2 Protokoll mit eindimensionaler Buchstabentafel 2

2.3 Protokoll mit zweidimensionaler Buchstabentafel 3

3 Erstellung von Buchstabentafeln **3**

3.1 Vorgehensweise 3

3.2 Fehleranalyse 3

3.2.1 Zufällige Fehler 3

4 Eignung der Protokolle **4**

4.1 Formulierung einer Testbedingung 4

4.2 Protokoll mit eindimensionaler Buchstabentafel 4

4.3 Protokoll mit zweidimensionaler Buchstabentafel 4

4.4 Auswertung 4

5 Ausblick **5**

5.1 Modifikation des Protokolls mit zweidimensionaler Buchstabentafel 5

5.2 Automatisierte Erstellung von Buchstabentafeln 5

A Ermittelte absolute und relative Häufigkeiten der Buchstaben **5**

B Optimierte eindimensionale Buchstabentafel **6**

C Optimierte zweidimensionale Buchstabentafel **6**

C.1 Benötigte Takte zum Ansteuern der jeweiligen Felder 6

C.2 Belegung der jeweiligen Felder mit Buchstaben (ohne „Q“) 6

1 Fragestellung und Motivation

Vor Kurzem habe ich den Film „Schmetterling und Taucherglocke“ von JULIAN SCHNABEL (im Folgenden: „Film“) gesehen. In diesem wird die Geschichte von JEAN-DOMINIQUE BAUBY vermittelt, welcher einen Schlaganfall erleidet und von da an am Locked-In-Syndrom leidet: Beinahe vollständig gelähmt kann der Protagonist nur über das Blinzeln mit seinem linken Auge kommunizieren. Hierbei werden ihm von einem Betreuer Buchstaben, geordnet nach der relativen Häufigkeit in der (frz.) Sprache vorgelesen, BAUBY blinzelt einmal, sobald der gewünschte Buchstabe erreicht ist; dieser Buchstabe wird dann vom Betreuer wiederholt, ein weiteres Blinzeln bedeutet, dass dieser verworfen werden soll.

Während die Leistungsfähigkeit dieses Protokolls offenbar ausreicht, um ein Buch zu verfassen, stellt sich mir die Frage, inwiefern die Übertragungsgeschwindigkeit noch zu optimieren ist. Die in diesem Dokument behandelte Nullhypothese lautet: „Bei der Kommunikation mit Buchstabentafeln lässt sich durch Verwendung zweidimensionaler Buchstabentafeln die Übertragungsgeschwindigkeit gegenüber eindimensionalen Buchstabentafeln erhöhen.“

2 Modellierung

2.1 Einführung

Im Extremfall sind bei einer derart schweren Behinderung wie dem „Locked-In-Syndrom“ nur binäre Protokolle verwendbar, da den Betroffenen nur minimale Muskelbewegungen möglich sind. Eine Taktung des Protokolls durch eine externe Quelle (z.B. durch den Betreuer) erleichtert die Übertragung, da keine Start- und Stop-Signale für einzelne Nachrichtenblöcke verwendet werden müssen.

2.2 Protokoll mit eindimensionaler Buchstabentafel

Das im Film verwendete binäre getaktete Protokoll lässt sich im kryptografischen Sinne als Blockchiffre begreifen: Der eingehende Zeichenstrom wird aufgetrennt und jedes Zeichen einzeln kodiert. Übertragungsfehler bei einem Zeichen wirken sich nicht auf folgende Blöcke aus, da unmittelbar nach der Übertragung eines Zeichens die Möglichkeit des Verwerfens gegeben ist.

Zunächst wird den zu übertragenden Zeichen ein linear hochlaufender geordneter Index i zugeordnet, begonnen mit dem Zeichen mit der größten relativen Häufigkeit: Je niedriger die relative Häufigkeit, desto größer der Index (vgl. B).

Zur Übertragung eines Zeichens werden zunächst während $(i-1)$ Takten Null-Bits (keine Aktion seitens des Betroffenen) übermittelt. Im darauffolgenden Takt wird ein Eins-Bit (Aktion seitens des Betroffenen) übermittelt. Im nächsten Takt wird das mutmaßlich ausgewählte Zeichen vom Betreuer wiederholt. Im letzten Takt übermittelt der Betroffene, ob die Auswahl korrekt ist (Null-Bit) oder verworfen werden soll (Eins-Bit). Die Übertragung eines Zeichens nimmt also $(i+2)$ Takte in Anspruch.

Ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zeichen in der Nachricht bekannt, so ergibt sich die durchschnittliche kodierte Länge in Bit $L_\emptyset$ eines Zeichens als:

$$L_\emptyset = \sum_{n=1}^{i} (p_i \cdot (i+2))$$

Da ein Takt genau ein Bit hält, beträgt die zur Kodierung einer Nachricht benötigte Zeit T_K bei m Zeichen also:

$$T_K = m \cdot \sum_{n=1}^{i} (p_i \cdot (i+2))$$

2.3 Protokoll mit zweidimensionaler Buchstabentafel

Diese Modifikation des Protokolls aus 2.2 bezieht sich im Wesentlichen auf die Anwahl der Zeichen: Hier werden statt einem Index zwei Indizes verwendet. Das resultierende Protokoll ist immer noch binär und getaktet.

Zunächst werden den zu übertragenden Zeichen zwei linear hochlaufende Indizes i, j zugeordnet, begonnen mit dem Zeichen mit der größten relativen Häufigkeit: Je niedriger die relative Häufigkeit, desto größer die Summe der Indizes (vgl. C.1, C.2).

Zur Übertragung eines Zeichens werden zunächst während $(i-1)$ Takten Null-Bits (keine Aktion seitens des Betroffenen) übermittelt. Im darauffolgenden Takt wird ein Eins-Bit (Aktion seitens des Betroffenen) übermittelt. Im nächsten Takt wird der mutmaßlich ausgewählte Index i vom Betreuer wiederholt. Im darauf folgenden Takt übermittelt der Betroffene, ob die Auswahl korrekt ist (Null-Bit) oder verworfen werden soll (Eins-Bit). Dann werden während $(j-1)$ Takten Null-Bits (keine Aktion seitens des Betroffenen) übermittelt. Im darauffolgenden Takt wird ein Eins-Bit (Aktion seitens des Betroffenen) übermittelt. Im nächsten Takt wird der mutmaßlich ausgewählte Index j vom Betreuer wiederholt. Im darauf folgenden Takt übermittelt der Betroffene, ob die Auswahl korrekt ist (Null-Bit) oder verworfen werden soll (Eins-Bit). Die Übertragung eines Zeichens nimmt also $(i+j+4)$ Takte in Anspruch.

Ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zeichen in der Nachricht bekannt, so ergibt sich die durchschnittliche kodierte Länge in Bit $L_\emptyset$ eines Zeichens als:

$$L_\emptyset = \sum_{n=1}^{j} \left(\sum_{n=1}^{i} (p_i \cdot (i+j+4)) \right)$$

Da ein Takt genau ein Bit hält, beträgt die zur Kodierung einer Nachricht benötigte Zeit T_K bei m Zeichen also:

$$T_K = m \cdot \sum_{n=1}^{j} \left(\sum_{n=1}^{i} (p_i \cdot (i+j+4)) \right)$$

3 Erstellung von Buchstabentafeln

3.1 Vorgehensweise

Zunächst wurde die absolute Häufigkeit einzelner Buchstaben[1] im ersten Absatzes des Textes „In Absurdistan“ (Müller 2008), der gerade auf dem Frühstückstisch lag (im Folgenden: „Text“) durch Auszählen ermittelt (siehe A). Um Doppelzählungen durch wiederholtes Abzählen zu vermeiden, wurden gezählte Buchstaben mit einem Kugelschreiber markiert.

Sodann wurden die relativen Häufigkeiten der einzelnen Buchstaben errechnet (siehe A) und exemplarische Buchstabentafeln nach den in 2.2 und 2.3 beschriebenen Vorgaben errechnet (siehe B, C.2). Auf den im Text nicht vorkommenden Buchstaben „Q“ wurde bei der Erstellung der zweidimensionalen Buchstabentafel verzichtet, um eine Tafel im Format 5×5 zu erhalten.

3.2 Fehleranalyse

3.2.1 Zufällige Fehler

Die Zählung erfolgte für jeden Buchstaben einmalig. Es ist wahrscheinlich, dass Buchstaben ausgelassen (d.h. nicht gezählt) wurden, dies verschöbe die ermittelten relativen Häufigkeiten in Richtung häufig vorkommender Buchstaben.

Die relativen Häufigkeiten der Buchstaben im verwendeten Text entsprechen nicht exakt der Häufigkeitsverteilung in der deutschen Sprache. So kommen z. B. die Buchstaben „Q“, „X“, „Y“ in der deutschen Sprache, nicht jedoch im

[1] Es wurden nur die ersten 26 Buchstaben des in Westeuropa genutzten lateinischen Alphabets (nach *ISO-8859-1*) berücksichtigt. Umlaute, Satzzeichen u.Ä. wurden also nicht mitgezählt.

Text vor. Folge ist eine Ungenauigkeit im Rahmen einer Größenordnung der ermittelten absoluten Häufigkeiten bei selten vorkommenden Buchstaben.

Beim Zählen mit der Hand erfolgte die Zählung nach dem Alphabet. Da bei späteren Zählungen Ergebnisse vorheriger korrigiert wurden, indem bisher nicht gezählte Buchstaben markiert und addiert wurden, ist davon auszugehen, dass eine zufällige Bevorzugung von früher im Alphabet vorkommenden Buchstaben statt fand.

4 Eignung der Protokolle

4.1 Formulierung einer Testbedingung

Die einzige hier formulierte Bedingung für die Überlegenheit eines Protokolls stellt die zur Kodierung einer Nachricht benötigte Zeit dar; diese lässt sich auf die durchschnittliche kodierte Länge eines Zeichens $L_\emptyset$ (vgl. 2.2, 2.3) zurückführen: Ein Protokoll mit einem niedrigeren Wert von $L_\emptyset$ lässt eine schnellere Nachrichtenübermittlung zu.

Der Test wurde exemplarisch anhand der ermittelten Häufigkeitsverteilung der Buchstaben verwendeten Textes (siehe A) durchgeführt.

4.2 Protokoll mit eindimensionaler Buchstabentafel

$$
\begin{aligned}
L_\emptyset &= \sum_{n=1}^{i} (p_i \cdot (i+2)) \\
&= (0,1848 \cdot 3) + (0,1068 \cdot 4) + (0,1027 \cdot 5) + (0,0739 \cdot 6) + (0,0657 \cdot 7) + (0,0575 \cdot 8) + (0,0554 \cdot 9) \\
&\quad + (0,0493 \cdot 10) + (0,0452 \cdot 11) + (0,0431 \cdot 12) + (0,0370 \cdot 13) + (0,0329 \cdot 14) + (0,0246 \cdot 15) \\
&\quad + (0,0246 \cdot 16) + (0,0226 \cdot 17) + (0,0205 \cdot 18) + (0,0144 \cdot 19) + (0,0144 \cdot 20) + (0,0062 \cdot 21) \\
&\quad + (0,0062 \cdot 22) + (0,0062 \cdot 23) + (0,0041 \cdot 24) + (0,0021 \cdot 25) + (0 \cdot 26) + (0 \cdot 27) + (0 \cdot 28) \\
&= 8,4435
\end{aligned}
$$

4.3 Protokoll mit zweidimensionaler Buchstabentafel

$$
\begin{aligned}
L_\emptyset &= \sum_{n=1}^{j} \left(\sum_{n=1}^{i} (p_i \cdot (i+j+4)) \right) \\
&= (0,1848 \cdot 6) + (0,1068 \cdot 7) + (0,1027 \cdot 7) + (0,0739 \cdot 8) + (0,0657 \cdot 8) + (0,0575 \cdot 8) + (0,0554 \cdot 9) \\
&\quad + (0,0493 \cdot 9) + (0,0452 \cdot 9) + (0,0431 \cdot 9) + (0,0370 \cdot 10) + (0,0329 \cdot 10) + (0,0246 \cdot 10) \\
&\quad + (0,0246 \cdot 10) + (0,0226 \cdot 10) + (0,0205 \cdot 11) + (0,0144 \cdot 11) + (0,0144 \cdot 11) + (0,0062 \cdot 11) \\
&\quad + (0,0062 \cdot 12) + (0,0062 \cdot 12) + (0,0041 \cdot 12) + (0,0021 \cdot 13) + (0 \cdot 13) + (0 \cdot 14) \\
&= 8,1419
\end{aligned}
$$

4.4 Auswertung

Bezogen auf den Text „In Absurdistan“ (Müller 2008) haben die Protokolle haben eine in etwa gleiche durchschnittliche kodierte Länge eines Zeichens $L_\emptyset$ von etwas mehr als 8 Bits. Das Protokoll mit zweidimensionaler Buchstabentafel hat einen leicht günstigeren Wert; auf einen Signifikanztest wurde jedoch angesichts der Unwissenschaftlichkeit bei der Auswahl des Textes und überhaupt verzichtet.

5 Ausblick

5.1 Modifikation des Protokolls mit zweidimensionaler Buchstabentafel

Modifiziert man das Protokoll mit zweidimensionaler Buchstabentafel so, dass eine Prüfung, ob der gewählte Buchstabe auch korrekt ist, erst am Ende der Auswahl und nicht jeweils für Zeile und Spalte erfolgt, so ergibt sich für $L_\emptyset$ nunmehr:

$$L_\emptyset = \sum_{n=1}^{j} \left(\sum_{n=1}^{i} (p_i \cdot (i + j + 3)) \right)$$

Wie unschwer zu erkennen ist, ergibt sich für den verwendeten Text somit ein um eins vermindertes $L_\emptyset = 7,1419$, womit hier gegenüber dem Protokoll mit eindimensionaler Buchstabentafel ein Geschwindigkeitsvorteil von ca. 15% zu erlangen ist.

5.2 Automatisierte Erstellung von Buchstabentafeln

Mithilfe eines Computerprogrammes müsste es möglich sein, für einen jeweiligen Text eine optimale Buchstabentafel zu generieren. Sofern die Häufigkeitsverteilung von Zeichen in Texten eines Nutzers signifikant von der verwendeten Tafel abweicht, ließe sich somit einfach und kostengünstig eine benutzerfreundlichere Tafel erstellen.

A Ermittelte absolute und relative Häufigkeiten der Buchstaben[2]

Buchstabe	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit
A	36	0,0739
B	12	0,0246
C	21	0,0431
D	22	0,0452
E	90	0,1848
F	7	0,0144
G	12	0,0246
H	28	0,0575
I	52	0,1068
J	1	0,0021
K	3	0,0062
L	18	0,0370
M	16	0,0329
N	27	0,0554
O	11	0,0226
P	3	0,0062
Q	0	0
R	32	0,0657
S	50	0,1027
T	24	0,0493
U	10	0,0205
V	2	0,0041
W	3	0,0062
X	0	0
Y	0	0
Z	7	0,0144
Summe	487	1,0002

[2] Relative Häufigkeiten errechnet aus den absoluten Häufigkeiten, gerundet auf vier Nachkommastellen.

B Optimierte eindimensionale Buchstabentafel[3]

Index	Buchstabe	Index	Buchstabe
1	E	14	G (B)
2	I	15	O
3	S	16	U
4	A	17	F (Z)
5	R	18	Z (F)
6	H	19	K (P, W)
7	N	20	P (K, W)
8	T	21	W (K, P)
9	D	22	V
10	C	23	J
11	L	24	Q (X, Y)
12	M	25	X (Q, Y)
13	B (G)	26	Y (Q, X)

C Optimierte zweidimensionale Buchstabentafel

C.1 Benötigte Takte zum Ansteuern der jeweiligen Felder

Index	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6
2	3	4	5	6	7
3	4	5	6	7	8
4	5	6	7	8	9
5	6	7	8	9	10

C.2 Belegung der jeweiligen Felder mit Buchstaben (ohne „Q“)

Index	1	2	3	4	5
1	E	I	A	N	L
2	S	R	T	M	U
3	H	D	B	F	P
4	C	G	Z	W	J
5	O	K	V	X	Y

Literatur

[1] Lothar Müller „In Absurdistan“, *Süddeutsche Zeitung* Nr.72 vom 27. März 2008 / Seite 11

[3] In Klammern angegebene Buchstaben stellen andere optimale Besetzungen für den jeweiligen Index dar.