Algebraische Methoden zur Beschreibung des Lautwandels

Norbert ENDRES

Wir verfolgen in diesem Beitrag die Absicht, Hilfsmittel zur rechnergestützten Untersuchung des Lautwandels zur Verfügung zu stellen, wie sie in einem von Ulrich Schweier und dem Autor (beide Universität München) initiierten Projekt zum Vergleich des Wortschatzes slavischer Sprachen zum Einsatz kommen sollen. In den ersten beiden Kapiteln stellen wir eine von der Merkmalstheorie von Jakobson und Halle ausgehende Binärcodierung für die Phoneme der slavischen Sprachen vor und zeigen sich daraus ergebende Visualisierungsmöglichkeiten sowohl für Phoneminventare als auch für Regeln des Lautwandels. Die beiden folgenden Kapitel, die natürlich eine erschöpfende mathematische Abhandlung nicht ersetzen können, zeigen exemplarisch die sich durch die Algebra ergebenden Möglichkeiten, mit Phonemen und Regeln des Lautwandels zu rechnen. Zur (wahrscheinlich unangebrachten) Vorsicht weisen wir darauf hin, daß die in den letzten beiden Kapiteln auftretenden Symbole für Phoneme, im Gegensatz zu den ersten beiden Kapiteln, keinerlei konkreten Lautwert repräsentieren, sondern lediglich Zwecken des formalen Rechnens dienen.

1. Phonemcodierung am Beispiel der slavischen Sprachen

Wir gehen im Grundsatz von der Merkmalstheorie von Jakobson aus (JAKOBSON & HALLE 1955; HALLE 1971), derzufolge Phoneme durch Ausprägung bzw. Nichtausprägung gewisser Merkmale näherungsweise beschrieben werden können. Bei der Auswahl und Anwendung von Mengen von Merkmalen auf Phoneme nehmen wir einen strikt dichotomen Standpunkt ein, lassen uns also von folgenden Prinzipien leiten:

- Für alle Phoneme legen wir ein- und dieselbe Merkmalsliste zugrunde. Es gibt somit beispielsweise keine gesonderten vokal-

bzw. konsonantenspezifischen Merkmale. Gleichwohl ist es natürlich möglich, daß bei einer Familie von Phonemen ein Merkmal beständig nicht ausgeprägt ist.
- Für jedes Merkmal aus der Liste ist zu entscheiden, ob es ausgeprägt ist, oder ob es nicht ausgeprägt ist (ausschließendes oder; *tertium non datur*).
- Niemals dient eine Merkmalsbezeichnung als Negation einer anderen Merkmalsbezeichnung.

Es erweist sich als nützlich für eine Verkleinerung der Anzahl der zu betrachtenden Merkmale, wenn man an den klassischen Definitionen, wie sie in TOWNSEND & JANDA (1996, 28ff.) zu finden sind, behutsame Modifikationen vornimmt. Wir berücksichtigen in diesem Aufsatz lediglich inhärente Merkmale und kommen für die slavische Sprachfamilie mit den von uns so bezeichneten Merkmalen akutiert, entrundet, diffundiert, relaxiert, nasaliert, konsonantisiert, affriziert und jotiert aus, die wir mit `aku, eru, dif, rlx, nas, kon, frz` und `jot` abkürzen und deren genauere, vom bisher üblichen Gebrauch abweichende Definitionen nachstehend ausgeführt werden, wobei wir etablierte Sprechweisen in kursiver Schrift wiedergeben, insbesondere deshalb, um zur Vermeidung von Mißverständnissen begriffliche Abweichungen zwischen der klassischen und der von uns verwendeten Notation kenntlich zu machen.

Lagebezeichnungen des Artikulationsortes werden mit `aku` und `eru` angegeben: `aku` bedeutet die Unterscheidung *zentral* vs. *peripher* (*zentrale* Phoneme sind akutiert), und `eru` steht für das Paar *vorne* vs. *hinten*. Hierbei vertreten wir den komplementären Standpunkt bei der Definition von Artikulationsorten von Vokalen, betrachten also statt der Lage der Zunge die Lage ihres Komplements, d.h. die Lage des von der Zunge freigelassenen Leerraumes. In diesem Sinne werden /o/ und /u/ *vorne* gesprochen und sind daher nicht entrundet bzw. *rund*; /a, e, i/ werden *hinten* gesprochen und sind infolge dessen entrundet bzw. *unrund*.

`dif` repräsentiert *kompakt* vs. *diffus*, wobei bei der diffundierten (*diffusen*) Variante bei gleichem Artikulationsort eine konstant gehaltene

Engstelle die Lautbildung vornimmt (vgl. /e/:/i/, /b/:/w/; die letzteren hinter dem Doppelpunkt sind die diffundierten).

`rlx` unterscheidet zwischen tonarmen (*flachen* bzw. relaxierten) und volltönenden Phonemen und betrifft bei Konsonanten die Paarung *stimmlos* vs. *stimmhaft* und bei Vokalen die Paarung *offen* vs. *geschlossen*.

`nas` steht für eine Verallgemeinerung der Paarung *nasal* vs. *oral* (nicht nasaliert), wobei der nasalierten Variante eine zusätzliche Resonanzkomponente (Nasenraum, Zunge bei /l/ und /r/) außer der Mundhöhle zur Verfügung steht.

Die Eigenschaft `kon` haben alle Phoneme, bei denen zusätzlich zu einem schwingenden Hohlraum eine feststoffliche Komponente an der Lautbildung beteiligt ist. Konsonanten, Halbvokale und Gleitlaute im herkömmlichen Sinne, d.h. alle Phoneme mit den Jakobsonschen Merkmalen "*konsonantisch* und *nichtvokalisch*", "*konsonantisch* und *vokalisch*" und "*nichtkonsonantisch* und *nichtvokalisch*" sind konsonantisiert; der Rest ist nichtkonsonantisiert.

`frz` drückt die Verschiebung zum nächstliegenden Reibelaut aus und geht einher mit der Paarung *strident* (affriziert) vs. *mellow* aus TOWNSEND & JANDA (1996). Weiterhin kann frz als ein dif zweiter Stufe betrachtet werden, da beide mit einer Verengung des Artikulationsortes einhergehen, wobei aber durch dif alleine noch kein Reibegeräusch entsteht.

`jot` schließlich markiert den Unterschied zwischen den *palatalisierten* (jotierten) und *nichtpalatalisierten* Spielarten von Phonemen und steht für eine Agglutination mit dem Gleitlaut /j/. Wollte man andere Sprachfamilien studieren, so müßte man geeignete weitere Merkmale einführen, beispielsweise `beh` (behaucht) oder `lab` (labialisiert) für Agglutinationen mit den Gleitlauten /ɥ/ oder /w/.

Mit den oben getroffenen Vereinbarungen und der Konvention, für die Ausprägung eines Merkmals eine Eins für den logischen Wert wahr und für die Nichtausprägung eines Merkmals eine Null für den logischen Wert falsch zu schreiben, ergibt sich nun die Möglichkeit, jedes im Slavischen auftretende Phonem durch eine achtstellige Folge von Nullen und Einsen (oder Binärzahl) eindeutig zu codieren, wobei man natürlich von vorne herein eine Reihenfolge der betrachteten Merkmale zugrundezulegen hat, um sicherzustellen, welche Stelle der Folge welchem Merkmal entspricht. Im nächsten Kapitel werden alle für das Slavische relevanten Phoneme (und noch einige zusätzliche) in einem Tableau dargestellt; jedes Feld dieses Tableaus steht stellvertretend für eine achtstellige Binärzahl, wobei die Merkmale in der Reihenfolge `rlx, jot, eru, dif, aku, frz, nas, kon` angeordnet sind. In diesem Sinne entspricht das Feld mit dem Phonem /i/ der Zahlenfolge `00111000`.

2. Visualisierungsverfahren

Ein bequemes Hilfsmittel zur Visualisierung von Phoneminventaren sind Karnaugh-Veitch-Symmetriediagramme (KVS-Diagramme), die unter anderem in der Digitaltechnik zur Minimierung von Schaltfunktionen Verwendung finden (KLAR 1975, 76ff.). Beginnend mit einem KVS-Diagramm für ein Merkmal erhält man induktiv die Diagramme für eine gewünschte höhere Anzahl von Merkmalen, indem man folgendes Konstruktionsprinzip anwendet, wobei wir vom Vorliegen eines KVS-Diagramms für n Merkmale ausgehen:

1. Erweiterung der Einträge des Tableaus für n Merkmale um eine zusätzliche Null,
2. Spiegelung des Tableaus, seiner Einträge und Symmetrieachsen an der unteren (für ungerade n) bzw. rechten (für gerade n) Begrenzungslinie, die damit den Status einer Symmetrieachse für das (n+1)-te Merkmal erhält,
3. Ersetzung der unter (1) hinzugefügten Nullen durch Einsen im gespiegelten Teil.

Wir illustrieren das beschriebene Vorgehen in Diagramm 1, indem wir die KVS-Diagramme für ein bis drei Merkmale darstellen; Symmetrieachsen für das i-te Merkmal werden mit M_i bezeichnet (i=1,2,3).

M_1	
0	1

	M_1	
	0 0	1 0
M_2	0 1	1 1

	M_3			
	M_1		M_1	
	0 0 0	1 0 0	1 0 1	0 0 1
M_2	0 1 0	1 1 0	1 1 1	0 1 1

Diagramm 1

Wir geben in Diagramm 2 das in Kapitel 1 versprochene Phoneminventar für die slavische Sprachfamilie als 8-dimensionales KVS-Diagramm wieder, wobei nur die inhärenten Merkmale berücksichtigt werden. Die Aufstellung zeigt weiterhin eine der Möglichkeiten zur Einordnung der Phoneme unter klassische Konzepte (weitere werden in ENDRES 1999 besprochen) und legt eine Erweiterung dieser Konzepte nahe, sofern man sich die komplementäre Sichtweise zum Artikulationsort von Vokalen aus Kapitel 1 zu eigen macht.

Wir verwenden die Grapheme der Jer-Vokale *ь* und *ъ* (beide kursiv geschrieben), um in etwa den Lautwert wiederzugeben, der ihnen im Urslavischen zugeschrieben wird (PANZER 1991, 276). /ъ/ wird gesprochen wie bulgarisch *българия*, /ə/ repräsentiert den Schwa-Laut.

Die Pfeilspitzen geben, ebenso wie später in Diagramm 3, die Richtung an, in die gespiegelt werden muß, um die Ausprägung des beigeordneten Merkmals zu erreichen.

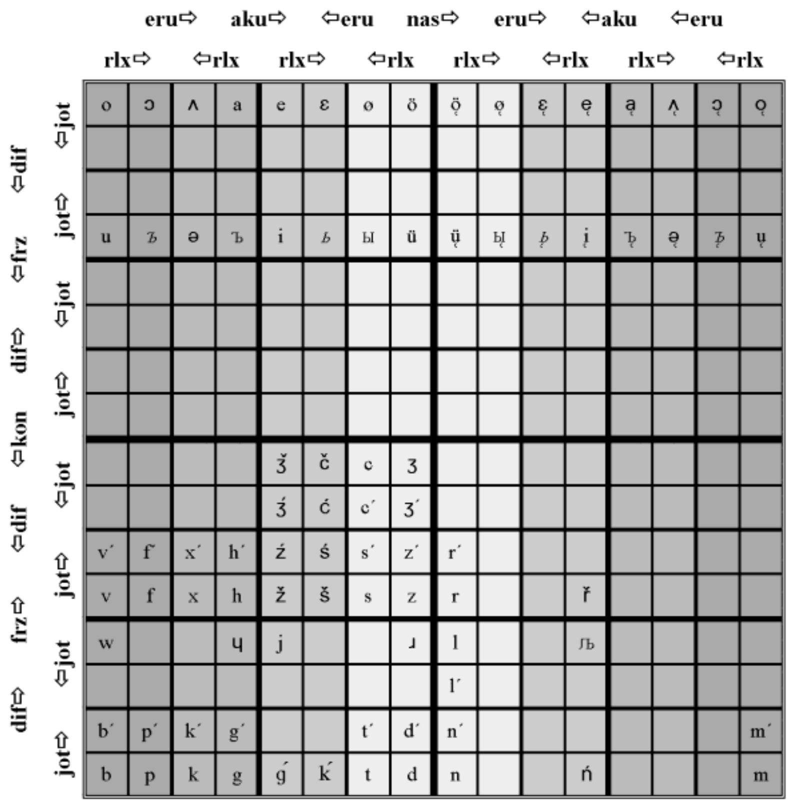
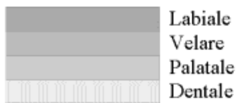


Diagramm 2

Legende:


Faßt man die Felder eines KVS-Diagramms als Punkte und die Symmetrieachsen als Kanten auf, so gelangt man zu Würfelschemata. Hier werden zwei Punkte immer dann durch eine mit dem Merkmal M bezeichnete Kante verbunden, wenn im KVS-Diagramm die zu ihnen gehörenden Felder bezüglich der ihnen am nächsten liegenden, zum Merkmal M gehörenden Achse symmetrisch liegen (*o* und *ö* werden durch die Kante `aku` verbunden, *o* und *ę* jedoch nicht durch die Kante `eru`).

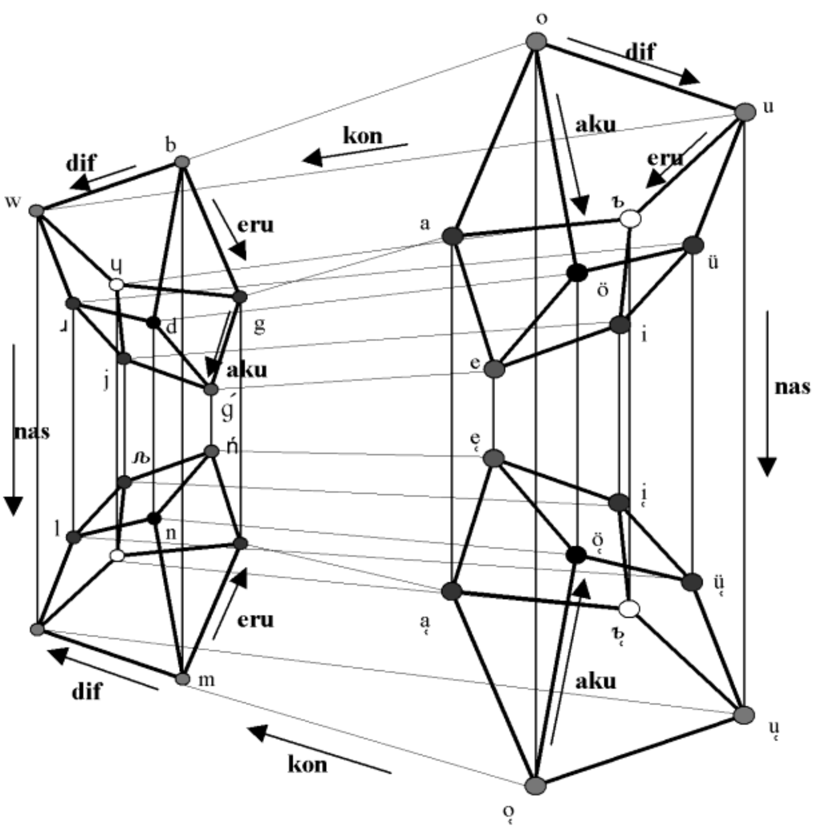


Diagramm 3

Diagramm 3 zeigt eine Teilmenge des 8-dimensionalen KVS-Diagramms als Würfelschema und visualisiert die Beziehungen zwischen Vokalen, Gleitlauten und Halbvokalen.

3. Mathematische Grundlagen

Die im folgenden verwendete Axiomatik gehört in wesentlichen Teilen zur Booleschen Algebra. Einen Überblick hierzu findet man in KLAR (1975, 58ff.); für tiefergehende Einsichten in die Algebra verweisen wir auf GRAETZER (1968).

Für $\mathbf{Z}_2$:={0,1} betrachten wir die als "logisches und" bzw. "logisches oder" bezeichneten binären Operatoren $\wedge$ bzw. $\vee$ von $\mathbf{Z}_2 \times \mathbf{Z}_2$ nach $\mathbf{Z}_2$, die durch die Tafeln

$\wedge$	0	1
0	0	0
1	0	1

$\vee$	0	1
0	0	1
1	1	1

gegeben sind, sowie den als Negation bezeichneten unären Operator $\overline{}$ von $\mathbf{Z}_2$ nach $\mathbf{Z}_2$, wobei die Definitionen $\overline{1}$:=0, $\overline{0}$:=1 gelten und zweimalige Anwendung der Negation die Identität ergibt.

Die binären Verknüpfungen $\wedge$ und $\vee$ sind assoziativ und kommutativ, d.h.

$$(a * b) * c = a * (b * c), \; a * b = b * a,$$

für a, b, c $\in$ $\mathbf{Z}_2$, wobei $*$ jeweils für einen der beiden Operatoren $\wedge$ bzw. $\vee$ steht; weiterhin ist 0 neutrales Element bzgl. $\vee$ sowie 1 neutrales Element bzgl. $\wedge$, d.h. $a \vee 0 = a$, $a \wedge 1 = a$. Eine Menge mit einer assoziativen Verknüpfung und einem neutralen Element wird Monoid genannt; somit sind ($\mathbf{Z}_2$,$\vee$) und ($\mathbf{Z}_2$,$\wedge$) kommutative Monoide.

Faßt man 0 und 1 nicht als logische Werte falsch und wahr auf, sondern als ganze Zahlen, so gilt für a, b $\in$ $\mathbf{Z}_2$

$$a \wedge b = \min (a,b), \; a \vee b = \max (a,b), \quad \overline{a} = 1 - a.$$

Die Addition + ist ein weiterer binärer Operator auf $\mathbf{Z}_2$, der mit den soeben eingeführten logischen Operatoren in engem Zusammenhang steht. Sie ist gegeben durch die Tafel

+	0	1
0	0	1
1	1	0

Die Addition ist kommutativ und assoziativ und hat 0 als neutrales Element. Für gegebene a, b $\in$ $\mathbf{Z_2}$ ist die Gleichung a + x = b (und somit x + a = b wegen Kommutativität) eindeutig lösbar mit x = a + b als Lösung.

Mengen mit einer assoziativen binären Verknüpfung und einem neutralen Element (also Monoide), in der die beiden obigen Gleichungstypen eindeutig lösbar sind, werden als Gruppen bezeichnet. In diesem Sinne ist ($\mathbf{Z_2}$,+) eine kommutative Gruppe (auch Abelsche Gruppe genannt). Zwischen + einerseits und $\wedge$, $\vee$, $\overline{\ }$ andererseits besteht der Zusammenhang (a, b $\in$ $\mathbf{Z_2}$)

$$a + b = (a \wedge \overline{b}) \vee (\overline{a} \wedge b) = (a \vee b) \wedge (\overline{a} \vee \overline{b}),$$

somit ist + nichts anderes als ein “ausschließendes oder”. — Wir fügen noch die Identität

$$\overline{a} + b \quad = \overline{a + b}$$

für spätere Zwecke hinzu.

Als Beschreibungsmodell für Phoneme legen wir für eine geeignete natürliche Zahl n (für das Beispiel der slavischen Sprachfamilie aus den vorigen Kapiteln war n=8) ein n-faches kartesisches Produkt $\mathbf{Z_2^n}$ von $\mathbf{Z_2}$ zugrunde, also die Menge aller n-Tupel mit aus Nullen und Einsen bestehenden Einträgen. Alle für $\mathbf{Z_2}$ vorgestellten Operatoren lassen sich mühelos auf $\mathbf{Z_2^n}$ übertragen, indem man sie komponentenweise anwendet. Schreibt man $*$ für einen der binären Operatoren $\wedge$, $\vee$, +, so bekommt man den entsprechenden Operator in $\mathbf{Z_2^n}$ mit der Vereinbarung

$$(a_1, a_2, \ldots a_n) * (b_1, b_2, \ldots b_n) := (a_1 * b_1, a_2 * b_2, \ldots a_n * b_n)$$

Um Lautwandel mathematisch zu beschreiben, führen wir – zunächst nur rein formal – die Multiplikation von Matrizen mit Spaltenvektoren ein. Für eine s×r-Matrix von Elementen aus $\mathbf{Z_2^n}$, also ein rechteckiges Schema mit r Spalten und s Zeilen von Werten aus $\mathbf{Z_2^n}$, sowie einen Vektor mit r Einträgen aus $\mathbf{Z_2^n}$ vereinbaren wir ($\tau_{ij} \in \mathbf{Z_2^n}$, $\omega_j \in \mathbf{Z_2^n}$, i $\in$ {1, 2, ... s}, j $\in$ {1, 2, ... r})

$$\begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & \tau_{1r} \\ \cdot & & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot & \cdot \\ \tau_{s1} & \tau_{s2} & \cdot & \cdot & \cdot & \tau_{sr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \omega_r \end{bmatrix} :=$$

$$= \begin{bmatrix} (\tau_{11} \wedge \omega_1) \vee (\tau_{12} \wedge \omega_2) \vee ... \vee (\tau_{1r} \wedge \omega_r) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ (\tau_{s1} \wedge \omega_1) \vee (\tau_{s2} \wedge \omega_2) \vee ... \vee (\tau_{sr} \wedge \omega_r) \end{bmatrix}$$

Hierbei steht die Matrix stellvertretend für eine Regel des Lautwandels, und der Spaltenvektor repräsentiert ein Wort. Es wäre zwar naheliegend, Wörter nur durch die Abfolge ihrer Phoneme zu beschreiben; für die rechnerische Behandlung erweist es sich jedoch als günstig, eine Art von Verdoppelung der Phoneme vorzunehmen: Für ein aus m Phonemen α_1, α_2, ... $\alpha_m \in \mathbf{Z_2}^{\mathbf{n}}$ zusammengesetztes Wort $w = \alpha_1\ \alpha_2 ... \alpha_m$, also ein Wort der Länge m, bilden wir die Folge $\alpha_1\overline{\alpha}_1\ \alpha_2\overline{\alpha}_2\ ...\ \alpha_m\overline{\alpha}_m$ und nehmen als Repräsentanten für w den entsprechenden Vektor mit 2m Einträgen, den wir aus Platzgründen hier nicht explizit wiedergeben.

Um ein Wort w der Länge p in ein Wort w´ der Länge q umzuwandeln, bildet man zu w den entsprechenden, 2p-dimensionalen Vektor und beschreibt den Lautwandel mit einer geeigneten Matrix aus 2p Spalten und 2q Zeilen. Multiplikation der Matrix mit diesem Vektor gemäß der oben gegebenen Definition liefert eine Folge $\beta_1\overline{\beta}_1\beta_2\overline{\beta}_2\ ...\ \beta_q\overline{\beta}_q$, aus der man das Ergebnis $w' = \beta_1\beta_2...\beta_q$ abliest. Wir werden im nächsten Kapitel das beschriebene Vorgehen anhand eines Beispiels vertiefen.

4. Ein Transformationsbeispiel

Mit den in Kapitel 3 bereitgestellten Hilfsmitteln lassen sich nun einige Phänomene des Lautwandels sehr elementar behandeln. Zur Demonstration wollen wir mit $w = \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4\alpha_5$ und $w' = \alpha_2\alpha_1\alpha_3\alpha_4'$ den Übergang $w \to w'$ für Phoneme $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_4', \alpha_5 \in \mathbf{Z_2^n}$ formal beschreiben, in dem Metathese am Wortanfang, der Ausfall eines Phonems am Wortende, ein bezüglich Plazierung und Lautwert konstant bleibendes Phonem sowie die Modifikation eines Phonems zu beobachten sind. Repräsentiert man w durch $\alpha_1\bar{\alpha}_1\ \alpha_2\bar{\alpha}_2 \ldots \alpha_5\bar{\alpha}_5$, bezeichnet man mit t_4 die Lösung der Gleichung $x + \alpha_4 = \alpha_4'$ in $\mathbf{Z_2^n}$, sowie mit $\mathbf{0}$ bzw. $\mathbf{1}$ die aus n Nullen bzw. n Einsen bestehenden Elemente von $\mathbf{Z_2^n}$, so überzeugt man sich leicht durch Rechnung unter Benutzung der im vorigen Kapitel gegebenen Regeln, daß die 8×10-Matrix

$$\begin{bmatrix}
\mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
\mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
\mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
\mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
\mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
\mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
\mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \bar{t}_4 & t_4 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
\mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & t_4 & \bar{t}_4 & \mathbf{0} & \mathbf{0}
\end{bmatrix}$$

das Gewünschte leistet, wie wir exemplarisch für die Modifikation von α_4 in α_4' zeigen werden: Multipliziert man die vorletzte bzw. letzte Zeile der Matrix mit dem zu $\alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_4\alpha_5$ gehörenden Vektor, so erhält man

$$(0 \wedge \alpha_1) \vee \ldots \vee (0 \wedge \bar{\alpha}_3) \vee (\bar{t}_4 \wedge \alpha_4) \vee (t_4 \wedge \bar{\alpha}_4) \vee (0 \wedge \alpha_5) \vee (0 \wedge \bar{\alpha}_5) =$$
$$= (\bar{t}_4 \wedge \alpha_4) \vee (t_4 \wedge \bar{\alpha}_4) = t_4 + \alpha_4 = \alpha_4',$$
$$(0 \wedge \alpha_1) \vee \ldots \vee (0 \wedge \bar{\alpha}_3) \vee (t_4 \wedge \alpha_4) \vee (\bar{t}_4 \wedge \bar{\alpha}_4) \vee (0 \wedge \alpha_5) \vee (0 \wedge \bar{\alpha}_5) =$$
$$= (t_4 \wedge \alpha_4) \vee (\bar{t}_4 \wedge \bar{\alpha}_4) = \bar{t}_4 + \alpha_4 = \bar{\alpha}_4'.$$

Die Verifikation der weiteren Zeilen des das Wort w´ repräsentierenden Vektors überlassen wir dem Leser. Es sei noch bemerkt, daß die Lösung der Gleichung $a + x = b$ im KVS-Diagramm genau die Achsen wiedergibt, an denen a (bzw. b) zu spiegeln ist, um b (bzw. a) zu erhalten: Die mit Einsen besetzten Stellen $i_1, i_2, \dots i_k$ von $a + b$ (mit $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n$) stehen stellvertretend für $M_{i1}, M_{i2}, \dots M_{ik}$.

Literatur

ENDRES, N. (1999): Eine Phonemcodierung zur Beschreibung des Lautwandels in slavischen Sprachen. Preprint.

GRAETZER, G. (1968): Universal Algebra. Princeton: D. Van Nostrand.

HALLE, M. (1959): The sound pattern of Russian: A linguistic and acoustical investigation. The Hague: Mouton.

JAKOBSON, R. and HALLE, M. (1955): Phonology and phonetics. In: R. JAKOBSON, Selected writings I, ’s-Gravenhage: Mouton, 464-504 (Erstveröffentlichung 1955).

KLAR, R. (1991): Digitale Rechenautomaten. Berlin: de Gruyter.

PANZER, B. (1991): Die slavischen Sprachen in Gegenwart und Geschichte. Frankfurt a/M: Verlag Peter Lang.

TOWNSEND, C.E. and JANDA, L.A. (1996): Common and Comparative Slavic: Phonology and Inflection. Columbus, Ohio: Slavica Publishers.