

A. Aufgabenstellung von Ulrich Stiehl

Ligaturen sind Konsonantenverbindungen, im Sanskrit von 2 bis maximal 5 Konsonanten, zum Beispiel von 2 (ts), von 3 (tsn), von 4 (tsny), maximal von 5 (rtsny).¹

Es gibt im Sanskrit 33 Konsonanten (siehe Sanskrit-Kompendium, 3. Auflage, Seite 299):

k, kh, g, gh, ñ, c, ch, j, jh, ñ, ṭ, ṭh, ḍ, ḍh, ṇ, t, th, d, dh, n, p, ph, b, bh, m, y, r, l, v, ś, ṣ, s, h

Beachte: kh, gh, ch, jh, ṭh, ḍh, th, dh, ph, bh zählen je als **ein** Konsonant, nicht als zwei.

Aufgrund meiner monatelangen Ligaturforschung konnte ich bislang 807 Ligaturen im Sanskrit tatsächlich belegen. Dazu kommen noch zusätzliche Ligaturen in Hindi, Pali usw. Siehe unten Seite 4: "Liste der 807 tatsächlich belegten Sanskrit-Ligaturen"; vergleiche <http://www.sanskritweb.de/itmanual2003.pdf>, Seite 28-42: "Ligatures of Sanskrit 2003". Diese 807 Ligaturen sind die **tatsächlich belegten** Sanskrit-Ligaturen im engeren Sinne.

1. Wieviele generell mögliche Sanskrit-Ligaturen gibt es?

Mathematisch kann man fragen: Wieviele Sanskrit-Ligaturen sind **generell möglich**?

Mathematisch zu beachten ist: Eine Sanskrit-Ligatur kann denselben Konsonanten mehr als einmal enthalten (z.B. kk, tt, nn), und die Anordnung (Reihenfolge) der Konsonanten muß immer berücksichtigt werden (z.B. st und ts sind zwei verschiedene Ligaturen). Daraus folgt, daß es sich mathematisch um **Variationen mit Wiederholungen** von n Elementen zur k-ten Klasse handelt, womit die mathematische Formel gilt:

$$n^k \quad (n = 33 \text{ Konsonanten; } k = 2, 3, 4, \text{ oder } 5 \text{ Konsonanten pro Ligatur})$$

Die Frage: Wieviele Sanskrit-Ligaturen sind **generell möglich**? wird damit so gelöst:

k	n^k	Teilsummen	Beispiele:
2	33^2	1089	kk, kkh, kc
3	33^3	35937	kk, kkl, kk, kkv
4	33^4	1185921	ktry, ktry
5	33^5	39135393	rtsny
Gesamtsumme		40358340	

Die Lösung, das heißt **40 358 340** generell mögliche Ligaturen, ist zwar mathematisch korrekt, aber praktisch sinnlos, weil hier Konsonantenverbindungen mitgezählt werden, die phonetisch unmöglich sind, z.B. kgt. Als **phonetisch möglich** gelten nur Ligaturen, die sich auch aussprechen lassen und den phonetischen Gesetzen gehorchen. So läßt sich z.B. kgt gar nicht aussprechen und gehorcht auch nicht den phonetischen Gesetzen.

¹ Zum Vergleich gibt es im **Deutschen** ebenfalls Konsonantenverbindungen mit 2 Konsonanten (**rl** in Kerl), mit 3 Konsonanten (**rls** in "des Kerls"), mit 4 Konsonanten (**rfst** in "du darfst") sowie mit 5 Konsonanten (**mpfst** in "du mampfst").

2. Wieviele phonetisch mögliche Sanskrit-Ligaturen gibt es?

Wenn man die phonetisch möglichen Sanskrit-Ligaturen durch mathematische Rechnung ermitteln will, muß man in die mathematische Aufgabe die phonetischen Restriktionen einbeziehen. Die phonetischen Regeln ergeben sich aus der Lehre der Phonetik.

Vergleiche dazu stets unten die "Liste der 807 tatsächlich belegten Sanskrit-Ligaturen"!

Die durch Gesetze der Phonetik präzisierte mathematische Aufgabenstellung lautet:

a) Weiterhin gültig sind diese Vorbedingungen:

n = 33 Konsonanten (wie gehabt)

k = 2, 3, 4, 5 (wie gehabt)

b) Dazu kommen zudem diese Vorbedingungen:

Die 33 Konsonanten werden in zwei Klassen aufgeteilt (siehe "Liste der 807..." unten, siehe zu den phonetischen Begriffen z.B. T. Alan Hall, Phonologie, Berlin 2000, Seite 216)

9 Sonoranten: **y, r, l, v, ñ, ñ̄, ṇ, n, m**

24 Obstruenten: k, kh, g, gh, c, ch, j, jh, ṭ, ṭh, ḍ, ḍh, t, th, d, dh, p, ph, b, bh, ś, ṣ, s, h

Und nun werden folgende Zusatzregeln aufgestellt (siehe "Liste der 807..." unten, die zum besseren Verständnis der Zusatzregeln unbedingt herangezogen werden muß):

1. Eine Ligatur kann maximal **2** Obstruenten und maximal **3** Sonoranten enthalten.
2. Es sind maximal **2** gleiche Obstruenten (tt) oder **2** gleiche Sonoranten (nn) möglich.
3. Eine Ligatur kann aus **nur** Obstruenten (z.B. tt) oder **nur** Sonanten (ry) bestehen.
4. Wenn eine Ligatur aus 2 Obstruenten **und** 1 bis 3 Sonoranten besteht, dann stehen die Sonoranten (a) entweder nur vor (b) oder nur hinter (c) oder vor und hinter den 2 Obstruenten, aber **niemals zwischen** den 2 Obstruenten (siehe "Liste..." unten!).
Phonetisch formuliert: Die Sonoranten stehen **immer außen** an den Silbengrenzen, entweder links oder rechts, oder links und rechts, aber nie zwischen den Obstruenten.

Man könnte **weitere** phonetische Restriktionen einführen², aber die letzte Restriktion ist bereits so kompliziert, daß die Aufgabe nur noch ein Mathematiker lösen kann.

Wieviele **phonetisch mögliche** Sanskrit-Ligaturen gibt es unter obigen Restriktionen?

Die Lösung dieser mathematischen Aufgabe geht weit über meinen äußerst begrenzten mathematischen Sachverstand hinaus.

Daher bin ich sehr erfreut, daß sich der holländische Mathematiker Maarten te Boekhorst der Lösung dieser interessanten Aufgabe auf der folgende Seite angenommen hat.

² Ein Beispiel für eine **weitere** phonetische Restriktion ist die "S-Regel". Diese besagt, daß eine Ligatur auch maximal **drei** (statt maximal zwei) Obstruenten enthalten kann, wenn einer dieser drei Obstruenten ein Zischlaut (ś oder ṣ oder s) ist, z.B. **tsk, tskh, tst, tsth, śks** usw., sowie plus Sonorant: **ksr, ntsr** usw.

B. Lösung der Aufgabe von Maarten te Boekhorst

K steht für die Konsonanten, analog **O**(bstruente) und **S**(onorante);
|K| steht für die Anzahl der Konsonanten, also 33, und analog |O| und |S|

Restriktionen:

R1 - maximal 2x O

R2 - maximal 3x S

R3 - wenn 2x O, dann benachbart

R4 - nicht 3 benachbarte gleiche (gibt es nur für S)

K² (2 Konsonanten)

keine relevante Restriktionen, also |K|² oder 33²; also

1 089 phonetisch mögliche Ligaturen

K³

relevante Restriktionen:

R1, R3, R4

wir unterscheiden jetzt in K zwischen O und S; erlaubt sind OOS, SOO, und OSS, SOS, SSO und SSS ohne 3 gleiche; also

$2x|O|^2x|S| + 3x|O|x|S|^2 + |S|^3 - |S|$ oder

$2x24^2x9 + 3x24x9^2 + 9^3 - 9$ oder

10368 + 5832 + 720 oder

16 920 phonetisch mögliche Ligaturen

K⁴

alle Restriktionen relevant

erlaubt sind OOSS, SOOS, SSOO, und SOSS, SSOS, und OSSS, SSSO ohne 3 gleiche, also

$3x|O|^2x|S|^2 + 2x|O|x|S|^3 + 2x|O|x|S|(|S|^3 - |S|)$ oder

$3x24^2x9^2 + 2x24x9^3 + 2x24x(9^3 - 9)$ oder

139968 + 34992 + 34560 oder

209 520 phonetisch mögliche Ligaturen

K⁵

alle Restriktionen relevant

erlaubt sind SOOSS, SSOOS, und OOSSS, SSSOO ohne 3 gleiche, also

$2x|O|^2x|S|^3 + 2x|O|^2x(|S|^3 - |S|)$ oder

$2x24^2x9^3 + 2x24^2x(9^3 - 9)$ oder

839808 + 829440 oder

1 669 248 phonetisch mögliche Ligaturen

Zusammen: 1 896 777 phonetisch mögliche Ligaturen

Fazit: Obwohl viel weniger als die **40 358 340** generell möglichen Ligaturen (s. Seite 1), betragen die **1 896 777** phonetisch möglichen Ligaturen doch sehr viel mehr als die **807** bislang tatsächlich belegten Ligaturen bzw. Konsonantenverbindungen des Sanskrit. Selbst wenn man auf die **1 669 248** fünfstelligen (K⁵) Ligaturen verzichten würde, würde immer noch die gewaltige Zahl von 1896777 - 1669248 = **227 529** Ligaturen übrigbleiben. Daraus folgt, daß es wegen des gigantischen Arbeitsaufwandes nie möglich sein wird, einen Devanagari-Font zu entwickeln, der **alle** phonetisch möglichen Ligaturen enthält.

C. Liste der 807 tatsächlich belegten Sanskrit-Ligaturen

5 Konsonanten:

rtsny

4 Konsonanten:

ktry ktvy kṣṇy kṣmy kstr gdvy gdhry ṅkty ṅktr ṅktv ṅkṣṇ ṅkṣm ṅkṣy ṅkṣv ṅgdhy ṅgdhv ṅghry tkṣm tkṣv ttry tstr tsthy tspr tsphy ddvy nttv ntry ntvy ntst ntsth ntsn ntsp ntsy ntsr ntsv nddhy nddhv ndry ndvy ndhry nstr nsphy ptry psny rkṣṇ rkṣy rkṣv rṅgy rjmy rttr rtvy rtry rtvy rtsn rtsy rddhy rdry rdvy rdhny rśvy rṣṭy rṣṇy lgvy ṣṭry stry sthny

3 Konsonanten:

kkr kkl kkṣ kty ktr ktv kthn kthy kny kpr kpl kmy kry kly kśm kśr kśl kśv kṣṇ kṣm kṣy kṣr kṣv kst ksth ksn ksp ksph ksm ksy ksr ksv ggr gghy gghr gjñ gjy gjv gdy gdr gdv gdhy gdhr gdhv gny gbr gbhy gbhr gmy gry grv gvy gvr ghny ghry ghvy ṅkt ṅkth ṅky ṅkr ṅkl ṅkv ṅkṣ ṅks ṅkhy ṅgdh ṅgy ṅgr ṅgv ṅghn ṅghy ṅghr ṅtr ṅtv ṅdhy ṅny ṅnr ṅpr ṅvy ṅvr ṅsv ccy cchm cchy cchr cchl cchv cñy jñ jyy jyv jjhy jñy jñv jmy jry jvy ñcm ñcy ñcv ñchn ñchy ñchr ñchl ñchv ññ ñjm ñjy ñjv ñśm ñśy ñśr ñśl ñśv ṭkr ṭkṣ ṭṭy ṭtr ṭtv ṭpr ṭsr ṭśl ṭst ṭsth ṭsn ṭsp ṭsv ḍgy ḍgr ḍghr ḍjñ ḍjy ḍḍhy ḍḍhv ḍdv ḍbr ḍbhy ḍbhr ḍvy ṇṭy ṇṭhy ṇḍḍh ṇḍy ṇḍr ṇḍv ṇḍhy ṇḍhr ṇvy tky tkr tkl tkv tkṣ tkhy ttn ttm tty ttr ttv tts tthy tny tnv tpr tpl tmy tyv try trv tvy tsk tskh tst tsth tsn tsp tsph tsm tsy tsr tsv thny thvy dgr dgl dghn dghr ddy ddr ddv ddhm ddhy ddhr ddhv dbr dbhy dbhr dbhv dmy dry drv dvy dvr dhny dhry dhvy dhvr nkr nkl nkṣ nkhy ngr ngl nghn nghr ntt ntth ntm nty ntr ntṣ nthy nddh ndm ndy ndr ndv ndhm ndhy ndhr ndhv nny nnv npr npl nps nbr nbhr nmy nmr nml nyv nvy nvr nsk nskh nst nth nsn nsp nsph nsm nsy nsr nsṣ nhy nhr nhv pkṣ pty ptr ptv pny ppr pry pśy psn psy psv bgr bdy bdhy bdhv bbr bbhy bvy bhry bhrv bhvy mny mpy mpr mpl mps mby mbr mbv mbhy mbhr mmy mmr mml mry rkc rkt rkth rkp rky rkṣ rks rkhy rgg rggh rgj rgbh rgy rgr rgl rgv rghn rghy rghr rṅkh rṅg rccch rcy rñ rjm rjy rjv rñj rḍy rḍhy rṇṇ rṇy rṇv rt rtn rtm rty rtr rtv rts rthy rddh rdm rdy rdr rdv rdhn rdhm rdhy rdhr rdhv rny rnṣ rpy rbr rbhy rbhr rbhv rmy rmr rml ryy rvy rvr rvl rśm rśy rśv rṣṭ rṣṭh rṣṇ rṣm rṣy rṣv rsv rhy rhr rhl rhv lky lgv lpy lby lbhy lly lvy lhy vny ścy śny śmy śry śrv śvy ṣky ṣkr ṣkl ṣkv ṣkṣ ṣṭy ṣṭr ṣṭv ṣṭhy ṣṭhv ṣṇy ṣṇv ṣpy ṣpr ṣpl ṣmy skr stm sty str stv sts sthn sthy sny spr sphy smy sry svy sss ssv hny hmy hv

2 Konsonanten:

kk kkh kc kch kṇ kt kth kn kp kph km ky kr kl kv kś kṣ ks khkh khn khy khv gg ggh gj gḍ gṇ gd gdh gn gb gbh gm gy gr gl gv ghn ghm ghny ghr ghv ṅk ṅkh ṅg ṅgh ṅñ ṅc ṅj ṅt ṅd ṅdh ṅn ṅp ṅbh ṅm ṅy ṅr ṅv ṅś ṅs ṅh cc cch cñ cm cy cr cv chy jj jjh jñ jm jy jr jv jhjh ñc ñch ñj ñjh ñś ṭk ṭkh ṭc ṭch ṭṭ ṭṇ ṭṭ ṭṭ ṭṭh ṭm ṭy ṭv ṭś ṭṣ ṭs ṭthy ḍg ḍgh ḍj ḍḍ ḍḍh ḍd ḍdh ḍb ḍbh ḍm ḍy ḍr ḍl ḍv ḍhy ḍhr ḍhv ṇṭ ṇṭh ṇḍ ṇḍh ṇṇ ṇṇ ṇm ṇy ṇv tk tkh tt tth tn tp tph tm ty tr tv ṭs ṭs thn thy thr thv dg dgh dd ddh dn db dbh dm dy dr dv dhn dhm dhy dhr dhv nk nkṣ ng ngh nt nth nd ndh nn np nph nb nbh nm ny nr nv nṣ ns nh pk pkh pc pch pṭ pṇ pt pn pp pph pm py pr pl pv pś ps bg bj bd bdh bb bbh by br bl bv bhṇ bhm bhny bhr bhl bhv mṇ mn mp mph mb mbh mm my mr ml mv yy yv rk rkh rg rgh rc rch rj rjh rṭ rḍ rḍh rṇ rt rth rd rdh rn rp rph rb rbh rm ry rl rv rś rṣ rs rh lk lg ld lp lph lb lbh lm ly ll lv lś lh vṇ vn vy vr vl śc śch śn śp śm śy śr śl śv śś ṣk ṣkh ṣṭ ṣṭh ṣṇ ṣp ṣph ṣm ṣy ṣr ṣv ṣṣ sk skh st sth sn sp sph sm sy sr sv ss hṇ hn hm hy hr hl hv