Das Rätsel der Eiszeiten, Teil 9, Global Circulation Models III

geschrieben von Lüdecke, Frey | 7. Juli 2014

scienceofdoom
In Teil VII haben wir auf einige frühe GCMs und deren Ergebnisse geschaut, in Teil VIII waren dann die GCMs aus dem ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts dran – atmosphärische GCMs, die die Wassertemperatur der Ozeane einbezogen sowie einige Modelle mittlerer Komplexität. Alle diese Studien versuchten, die fundamentale Grundlage des Einsetzens einer Eiszeit zu untersuchen – immer währende Schneebedeckung in hohen Breiten. Eine permanente Schneebedeckung kann zu permanenten Eisschilden führen – muss es aber nicht. Erforderlich ist also ein Eisschilde-Modell, das das komplexe Zusammenspiel von Wachstum, Zerbrechen, Gleiten und Wärmetransport der Eisschilde simuliert.
Angesichts der begrenzten Rechenmöglichkeiten der Modelle war schon die Konstruktion eines Modells, dass die Grundlagen permanenter Schneebedeckung simulieren kann (oder nicht), keine triviale Angelegenheit, aber ein komplettes Ozean-Atmosphäre-GCM mit einem Eisschilde-Modell, das 130.000 Jahre abdeckt, war überhaupt nicht möglich. In diesem Beitrag schauen wir auf eine Studie aus jüngster Zeit, in der vollständig gekoppelte GCMs verwendet worden sind.
‚Vollständig gekoppelt' bedeutet, dass ein atmosphärisches und ein ozeanisches Modell als Tandem agieren – wobei Wärme, Feuchtigkeit und Impulse übertragen werden.

Smith & Gregory (2012)

Das Problem:
Es ist allgemein akzeptiert, dass das Timing von Eiszeiten auf Variationen der Sonneneinstrahlung zurückzuführen ist, die aus dem Orbit der Erde um die Sonne resultieren (Hays et al. 1976, Huybers und Wunsch 2005). Diese

solaren Strahlungs-Anomalien müssen durch Rückkopplungs-Prozesse innerhalb des Klimasystems verstärkt werden, einschließlich der Änderungen der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentrationen (Archer et al. 2000) sowie des Wachstums von Eisschilden (Clark et al. 1999). Während es Hypothesen zu den Details dieser Rückkopplungen im Überfluss gibt, ist keine davon ohne Kritiker, und wir können noch nicht behaupten zu wissen, wie das System Erde das Klima erzeugte, das wir in zahlreichen Proxys wiederfinden. Das ist von mehr als nur akademischem Interesse: ein volles Verständnis des Kohlenstoffzyklus‘ während eines Eiszeitzyklus‘ oder Details darüber, wie sich der Meeresspiegel im Zuge des Wachsens und Schrumpfens von Eisschilden lokal verändert, **wären sehr nützlich bei der genauen Vorhersage zukünftiger Auswirkungen**

der anthropogenen CO2-Emissionen auf das Klima, können wir doch erwarten, dass viele der gleichen fundamentalen Rückkopplungen in beiden Szenarios stattfinden.
Der Jahrtausende lange Zeitskala bei der Modellierung auch nur eines einzigen Eiszeitzyklus' ist eine enorme Herausforderung für umfassende Modelle des Erdsystems, die auf gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen beruhen (AOGCMs). Wegen der begrenzten Rechenkapazität sind AOGCMs normalerweise auf Läufe über höchstens ein paar hundert Jahre limitiert, und deren Verwendung in paläoklimatischen Studien war allgemein kurz, sozusagen ein „Schnappschuss" aus einem speziell interessierenden Zeitabschnitt.
Kurzzeitige Simulationen glazialer Zyklen wurden bislang nur mit Modellen durchgeführt, bei denen

wichtige Klimaprozesse wie Wolken oder Feuchtetransporte in der Atmosphäre nur sehr grob parametrisiert sind oder ganz außen vor gelassen wurden. Die starken Beschränkungen hinsichtlich der Rückkopplungen in solchen Modellen zeigen auch dem, was wir über die Entwicklung des Klimas daraus lernen können, Grenzen auf, vor allem in paläoklimatischen Zuständen, die sich signifikant von den besser verstandenen heutigen Zuständen unterscheiden, die die Modelle eigentlich reproduzieren sollen. Die Simulation vergangener Klimazustände in den AOGCMs und der Vergleich derselben mit auf Proxys beruhenden Klimarekonstruktionen erlauben es ebenfalls, die Sensitivität der Modelle bzgl. Klima-Antrieben zu testen, um Vertrauen in deren Vorhersagen des zukünftigen Klimas zu gewinnen.

Ihr Modell:

Für diese Simulationen haben wir den FAMOUS benutzt (=FAst Met. Office and UK universities Simulator), eine niedrig aufgelöste Version des Hadley Centre Coupled Model (HadCM3) AOGCM. Die räumliche Auflösung im FAMOUS ist etwa halb so groß wie im HadCM3, was die Rechenkosten des Modells um einen Faktor 10 reduziert.

Ihr Plan:

Wir präsentieren hier die ersten kurzzeitigen Simulationen über den gesamten letzten Eiszeitzyklus. Wir haben den Rechenaufwand dieser Simulationen durch die Verwendung von FAMOUS reduziert. FAMOUS ist ein AOGCM mit einer relativ kleinen räumlichen Auflösung, und wir haben die Randbedingungen um einen Faktor 10 verändert, so dass 120.000 Jahre zu 12.000 Jahren werden. Wir untersuchen, wie die Einflüsse

orbitaler Variationen der Sonneneinstrahlung, Treibhausgase und Eisschilde der Nordhemisphäre zusammenspielen, um die Evolution des Klimas zu beeinflussen.
Es gibt bei diesem Beschleunigungsprozess aber ein Problem. Die Ozeane reagieren in ganz anderen Zeitmaßstäben auf Änderungen in der Atmosphäre. Einige ozeanische Prozesse dauern Tausende Jahre. Ob also die Verkürzung des Zeitraumes reale Klimabedingungen erzeugen kann, bleibt fraglich.
Ihr Vorgehen:
Ziel dieser Studie ist es, das physische Klima von Atmosphäre und Ozeanen während des letzten Eiszeit-Zyklus' zu untersuchen. Zusammen mit Änderungen der Sonneneinstrahlung infolge Variationen des Erdorbits um die Sonne betrachten wir die Eisschilde der Nordhemisphäre und Änderungen der Zusammensetzung von

Treibhausgasen als externe Antriebs-Faktoren des Klimasystems, die wir als Grenzbedingungen spezifizieren, entweder getrennt oder in Kombination. Änderungen der Sonnenaktivität, das Eis in der Antarktis, die Vegetation, Meeresströme oder Schmelzwasserflüsse aus den sich bildenden Eisschilden sind in diesen Simulationen nicht enthalten. Unser experimenteller Aufbau ist daher in gewisser Weise vereinfacht, wobei bestimmte potentielle Klima-Rückkopplungen ausgeschlossen sind. Obwohl dies teilweise dazu führt, dass in dieser Version von FAMOUS bestimmte Prozesse fehlen oder nur sehr schwach modelliert werden, erlaubt es uns diese Vereinfachung, den Einfluss spezifizierter Antriebe besser zu erkennen, ebenso wie die Sicherstellung, dass sich die Simulationen eng an das reale Klima

anlehnen.
Noch einmal zur Verdeutlichung der Kernpunkte dieser Modellierung:
1. Ein vollständiges GCM wird verwendet, jedoch mit reduzierter räumlicher Auflösung.
2. Die Antriebe werden um einen Faktor 10 beschleunigt im Vergleich zur Realität.
3. Zwei der eingehenden grundlegenden Antriebe sind in Wirklichkeit Rückkopplungen, die man spezifizieren muss, um das Modell zum Laufen zu bringen – das heißt, das Modell kann nicht diese beiden kritischen Rückkopplungen simulieren (CO2 und Ausdehnung der Eisschilde).
4. Es wurden 5 verschiedene Simulationen durchgeführt, um die Auswirkungen verschiedener Faktoren zu erkennen:
a) Nur orbitaler Antrieb (ORB)
b) Nur Antrieb durch Treibhausgase (GHG)

c) Nur Ausdehnung der Eisschilde (ICE)
d) Alle drei zusammen mit 2 unterschiedlichen Eisschild-Rekonstruktionen (ALL-ZH & ALL-5G – man beachte, dass ALL-ZH die gleiche Eisschild-Rekonstruktion aufweist wie ICE, während ALL-5g eine andere hat).
Die modellierten Temperaturergebnisse im Vergleich zu tatsächlichen Temperaturen für die Antarktis und Grönland (Schwarz) sehen so aus:



Abbildung 1: Temperaturunterschiede in vorindustrieller Zeit in der Ostantarktis (oben) und Grönland (unten). Aus Smith & Gregory 2012
Hier gibt es viele interessante Punkte.
Betrachten wir zunächst die Antarktis. Man erkennt, dass orbitale Antriebe allein sowie die

Eisschilde der Nordhemisphäre allein wenig oder gar keinen Einfluss auf die Modellierung der Temperaturen in der Vergangenheit haben. Aber die Treibhausgaskonzentrationen selbst als Antrieb zeigen eine modellierte Temperatur, die etwa ähnlich der letzten 120.000 Jahre ist – unabhängig von Temperaturvariationen mit höherer Frequenz, worauf wir später noch eingehen. Fügen wir die Eisschilde der Nordhemisphäre hinzu, bekommen wir sogar eine noch größere Übereinstimmung. Ich bin überrascht, dass die Eisschilde angesichts der Menge an Sonnenstrahlung, die sie reflektieren, nicht noch größeren Einfluss haben.
Sowohl Treibhausgase als auch Eisschilde kann man in der Wirklichkeit als positive Rückkopplungen betrachten (obwohl sie in diesem Modell spezifiziert sind). Für die Südpol-Region haben

die Treibhausgase einen viel stärkeren Effekt.
Schauen wir auf Grönland, erkennen wir, dass der orbitale Antrieb wieder einmal für sich allein kaum eine Auswirkung zeitigt, während Treibhausgase und Eisschilde allein ähnliche Auswirkungen haben, individuell aber weit entfernt sind vom tatsächlichen Klima. Kombiniert man alle Antriebe sehen wir eine gute Übereinstimmung mit tatsächlichen Temperaturen bei einer Rekonstruktion und eine nicht so gute Übereinstimmung bei einer anderen. Dies impliziert: Bei anderen Modellen, die versuchen, die Dynamik der Eisschilde zu simulieren (anstatt sie zu spezifizieren), kann die Genauigkeit für den Erfolg der Modellierung kritisch sein.
Wieder einmal erkennen wir, dass Temperaturvariationen höherer Frequenz überhaupt nicht gut

simuliert werden, und selbst bei Variationen mit geringerer Häufigkeit – zum Beispiel von vor 110.000 bis 85.000 Jahren – fehlt eine ziemliche Menge Variabilität (in dem Modell).
Die Autoren schreiben:
Die EPICA-Daten (Antarktis) zeigen, dass die Temperatur relativ zu ihren jeweiligen längerzeitlichen Trends stärker zurückging als das CO2 während dieser Zeit (vor 120.000 bis 110.000 Jahre), aber in unseren Experimenten sinken die simulierten Antarktis-Temperaturen gleichlaufend mit CO2. Dies zeigt, dass in unserem Modell eine wichtige Rückkopplung fehlt, oder dass unser Modell vielleicht über-sensitiv hinsichtlich CO2 ist und unter-sensitiv hinsichtlich eines der anderen Antriebsfaktoren. Tests des Modells, bei denen die Antriebe nicht künstlich beschleunigt wurden,

schließen die Möglichkeit aus, dass die Beschleunigung ein Faktor ist.

Abrupte Klimaänderung

Was ist mit den Temperatursignalen höherer Frequenz? Die Grönland-Daten zeigen eine viel höhere Größenordnung als die Antarktis bei

dieser Frequenz, aber keine von beiden wird in den Modellen reproduziert.
Der andere auffällige Unterschied zwischen dem Modell und der NGRIP-Rekonstruktion ist

das Fehlen abrupter Ereignisse mit großer Amplitude im Zeitmaßstab von Jahrhunderten, die aus Eisbohrkernen hervorgehen. Man glaubt, dass periodische Fluten von Schmelzwasser der

nordhemisphärischen Eisschilde und die nachfolgende Störung ozeanischer Wärmetransporte in diese Ereignisse involviert sind (Bond et al. 1993, Blunier et al. 1998), und das Fehlen von

Schmelzwasserabflüssen in unserem Modell ist möglicherweise einer der Hauptgründe, warum wir sie nicht simulieren können. **Die Autoren gehen dann noch etwas näher darauf ein, da diese**

Geschichte keineswegs settled ist, und kommen zu dem Ergebnis:
Alles in allem zeigt das Fehlen sowohl Jahrtausende langer Warnereignisse im Süden und abrupter Ereignisse im

Norden sehr deutlich, dass in unserem Modell eine wesentliche Rückkopplung mit ziemlicher Bedeutung fehlt.

CO_2^-

Rück

kopp

lung

Die

Prozesse

die

dazu

führ

en,
dass
hinr

eich

ende

Meng

en

Kohl

enst

off

in

den

Tiefender

eisz

eitl

iche

n

0zea

ne

abge

lage

rt

werden, um

die

in

den

Eisbohrkerne

n

erke

nnba

ren

atmo

sphä

risc hen co2-

Konzentration

nen

zu

erze

ugen

,

sind

nicht sehr

gut

vers

tand

en.
Sie
wurd

en

bis

heut

e

noch

nɪch

t

von

eine

m

real

isti

sche

n

geko

ppel
ten
Mode

ll

erfo

lgre

ich

simu

lier

t.

FAMOUS,

in
dies
er

Studie verw

ende

t,

enth

älter

ein

einf

ache

s

Biog


eoch
emie
-

Model, obwo

hl

es

nıch

t

auf

die

Antriebe in

dies

en

Simu


lati
onen
reag

iert

,

eine

zusätzliche

Aufnahme von

Kohlenstoff

aufz
uneh
men.

Eine weitere

FAMOUS-Simu

latition mit

interaktivem


atmo
sphä
risc

hem

co2

hat

kein
erlei

sign
ifik
ante

Änderungen

des CO2-Geha

ltes der Atmo

sphäre geze

itig

t,

wenn

orbi
tale
Vari

ation

nen

und

wach

send

e

Nord - Eiss

child
de
als

Antr
ieb
wirk

sam

ware

n.

Die genaue

Modellierung

eine

s

Eisz

eitz

yklu

s'

erfo

rder

t

eine
sign
ifik

ante

Zuna

hme

unse

res

Vers

tänd
nïss
es

der
invo
lvie

rten Proz esse

und

nicht

einf

ach

die

Einbezie hung

von

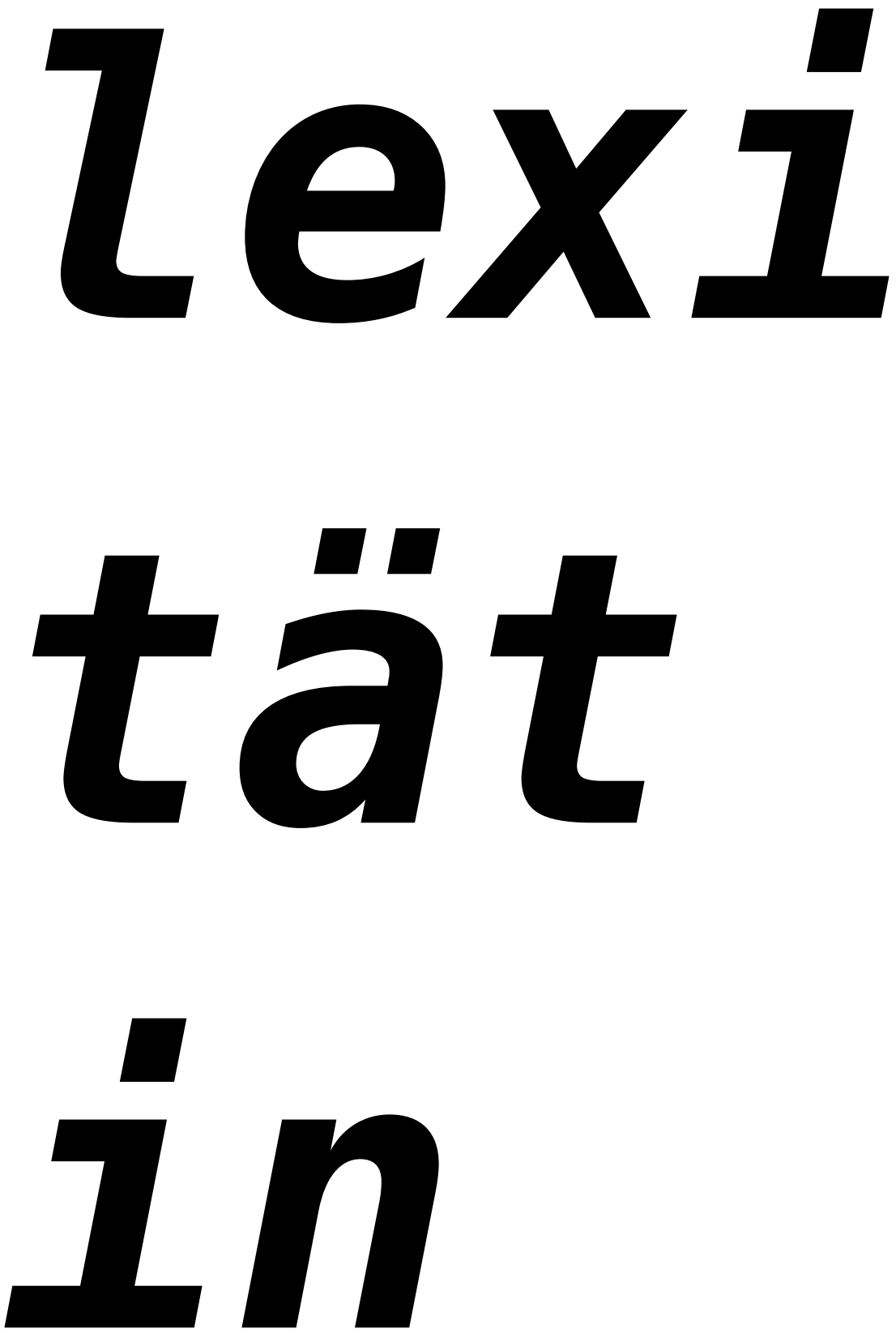
ein

wenig

g

mehr

Komp


lexi
tät
in

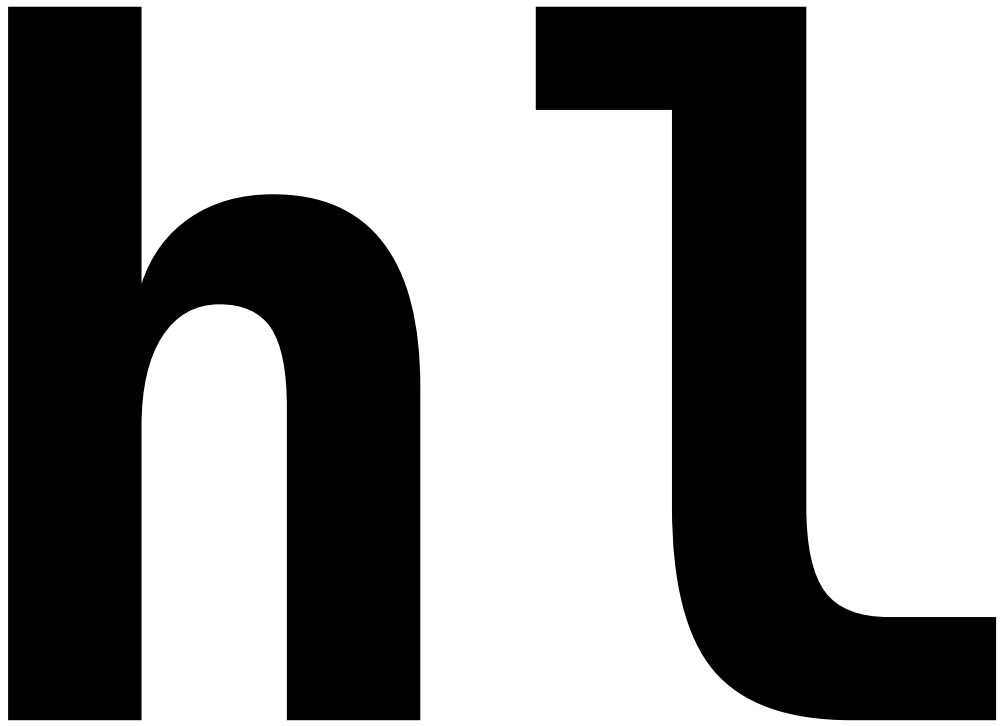
das

jetz

ige

Model.

Sc



us



ol

ge

ru

ng

Di

es

is

t

ei

ne

se

hr



te

re



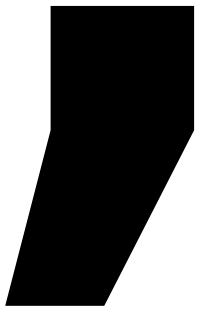
an

te

st


u d

ie



di

e

ei



ge


Er

fo



e

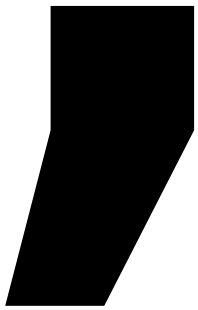
he

rv

or

he

bt



Gr

en

ze

n

de

r


Re

ch

en

ka

pa

zi

tä

te

n

au



ei

gt

SO

wi

e

ka

um

ve

rs

ta

nd

en

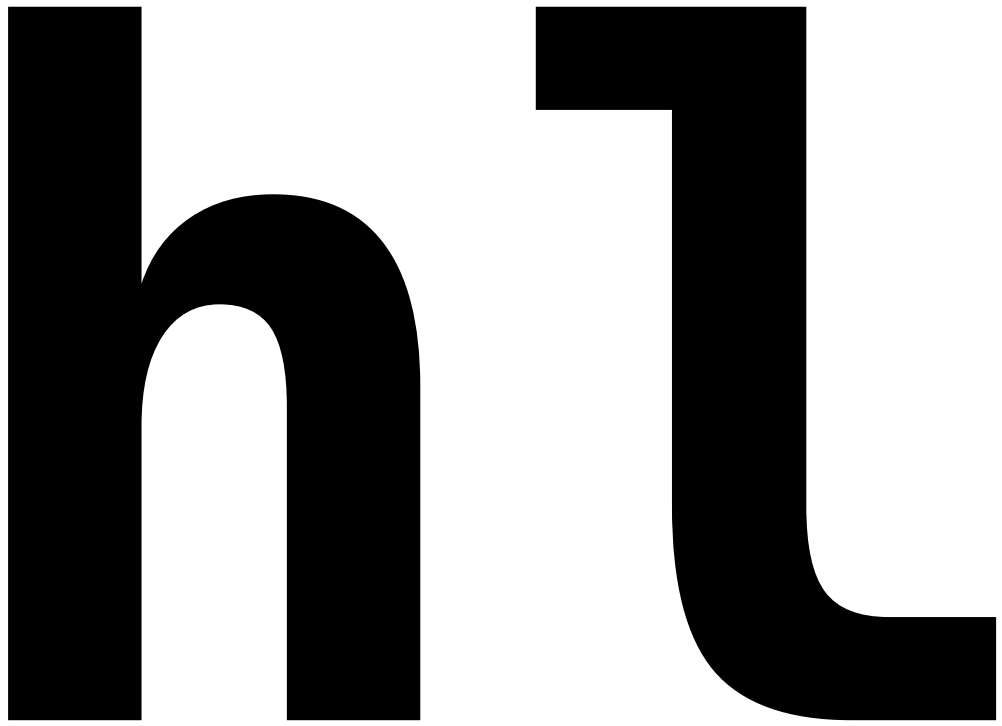
e

SO

wi

e

fe



en

de

Rü

ck

ko

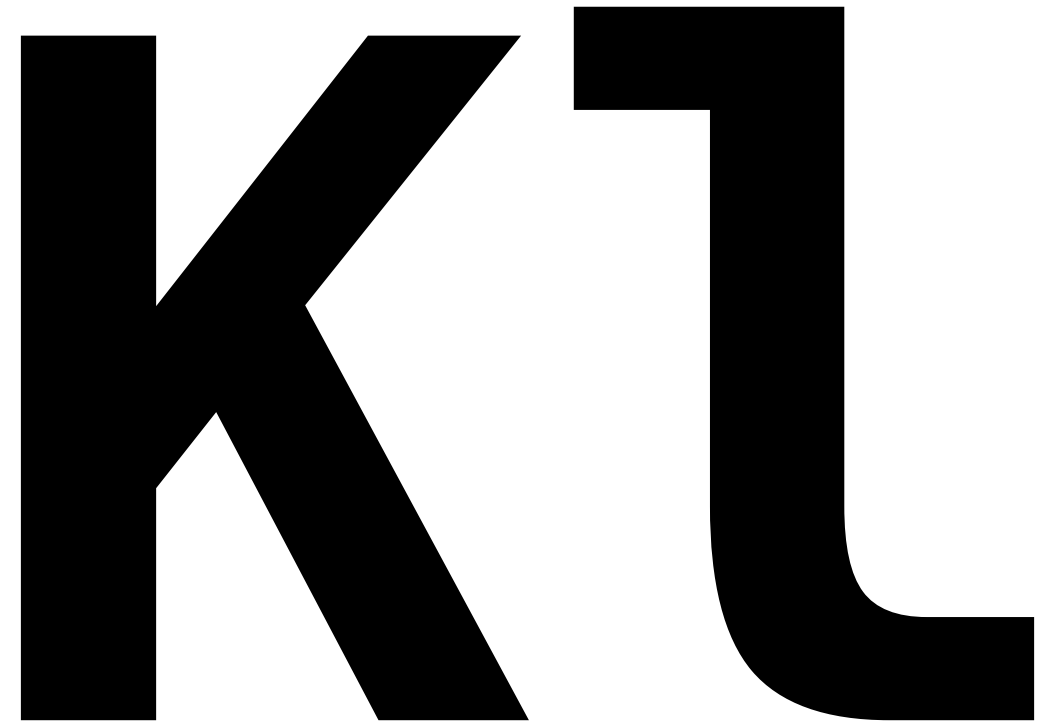
p p

lu

ng

en








am

od

el



n.

Di

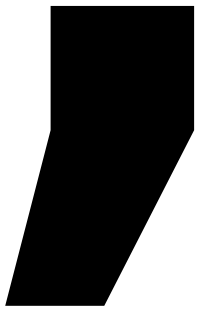
e

Ta

ts

ac

he



da



12

0.

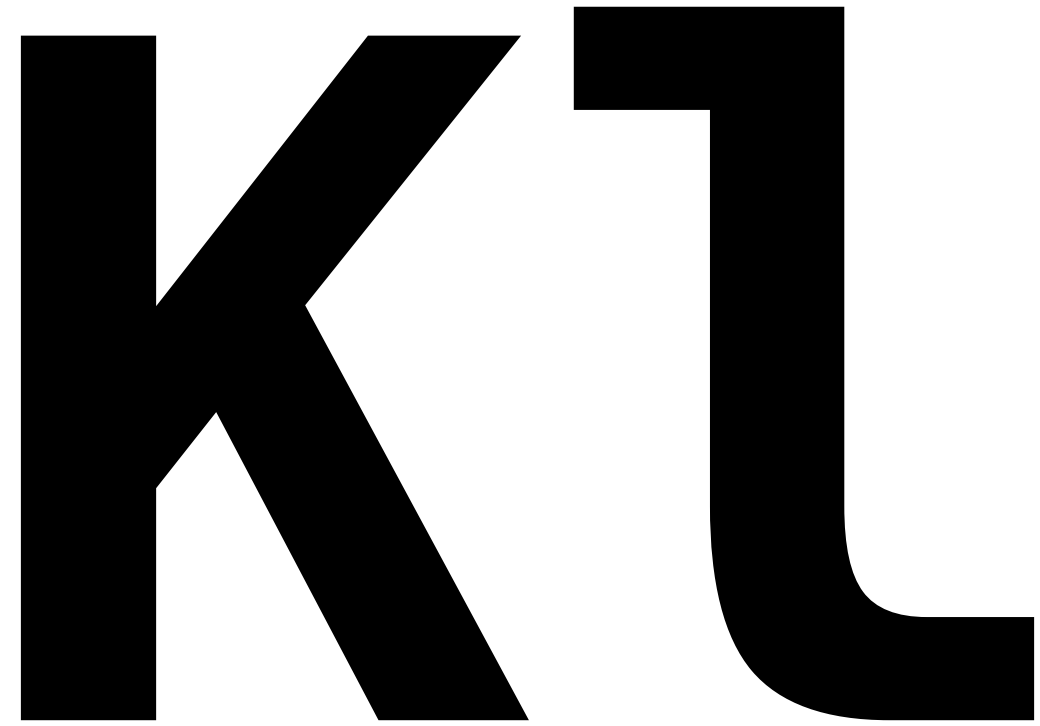
00

0

Ja

hr

e





ag

es

ch




ht

e



t

ei

ne

m

VO



st



di

ge

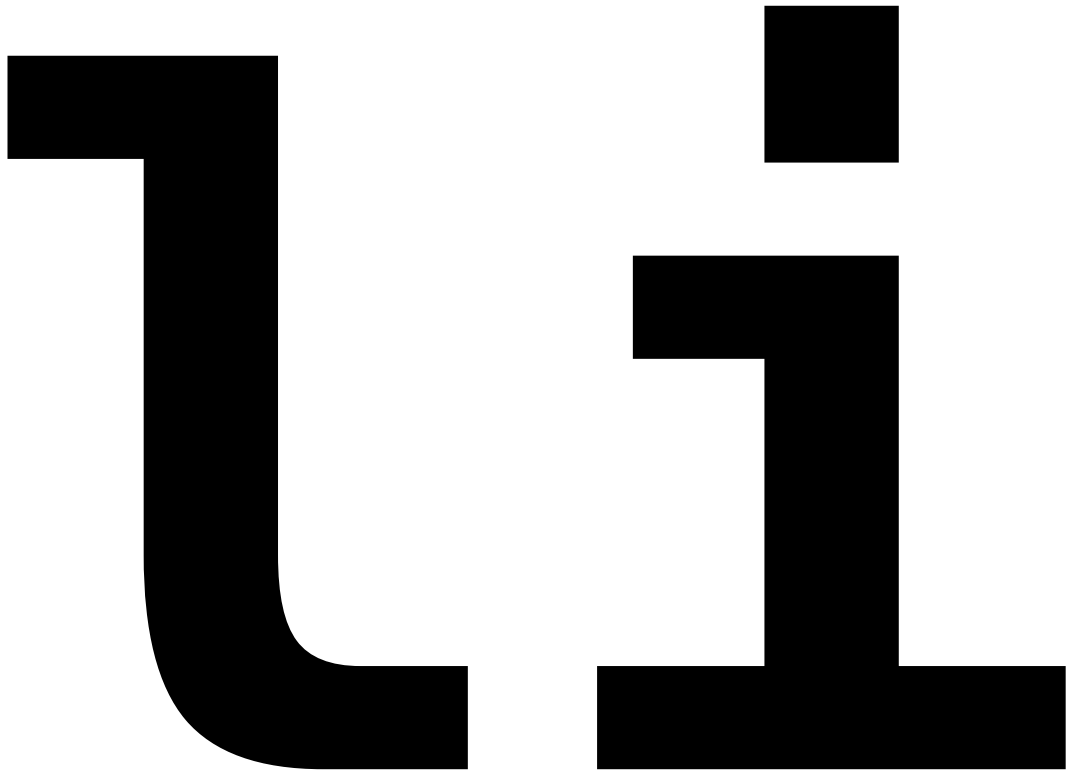
n

GC

M

sí

mu



er

t


we

rd

en

ko

n n

te

n,

is

t

SC

hö

n

zu

se

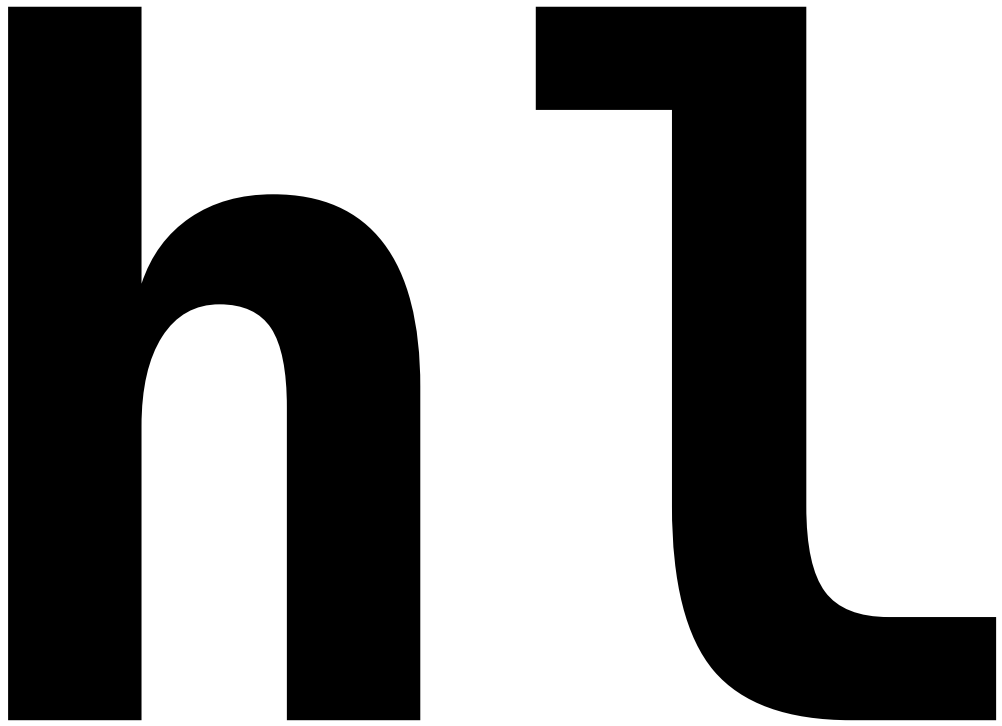
he

n.

Da

S


Fe



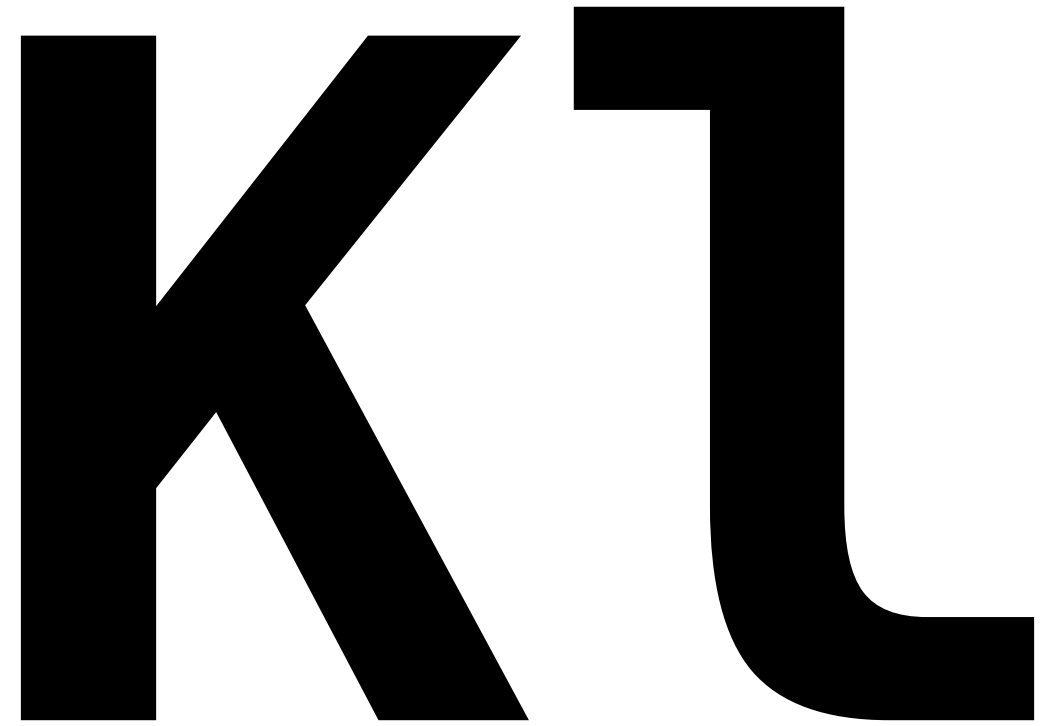
en


ab

ru

pt

er







nd

er

un

ge

n



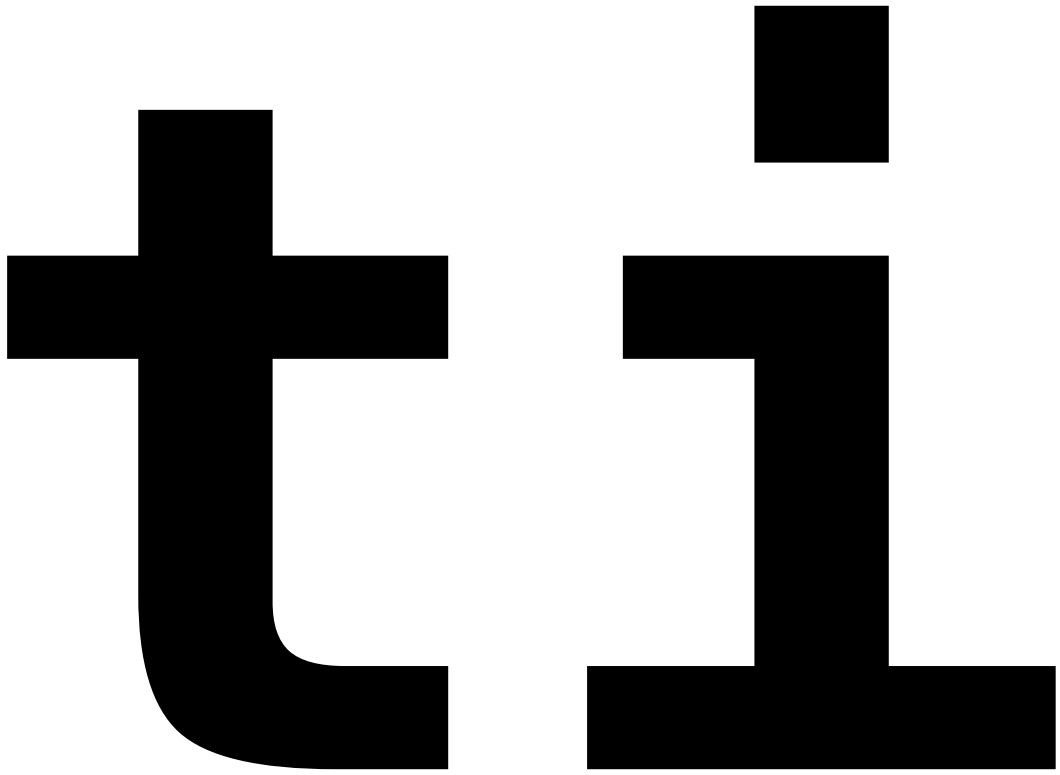
de

r

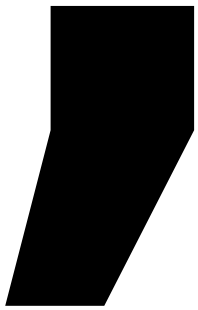
Si

mu


la



on



da

S

Sc

he


it

er

n,

di

e

ra

SC

he

Te

mp

er

at

ur


ab

na



e

zu


Be

gi

n n

de

r

Au


sl



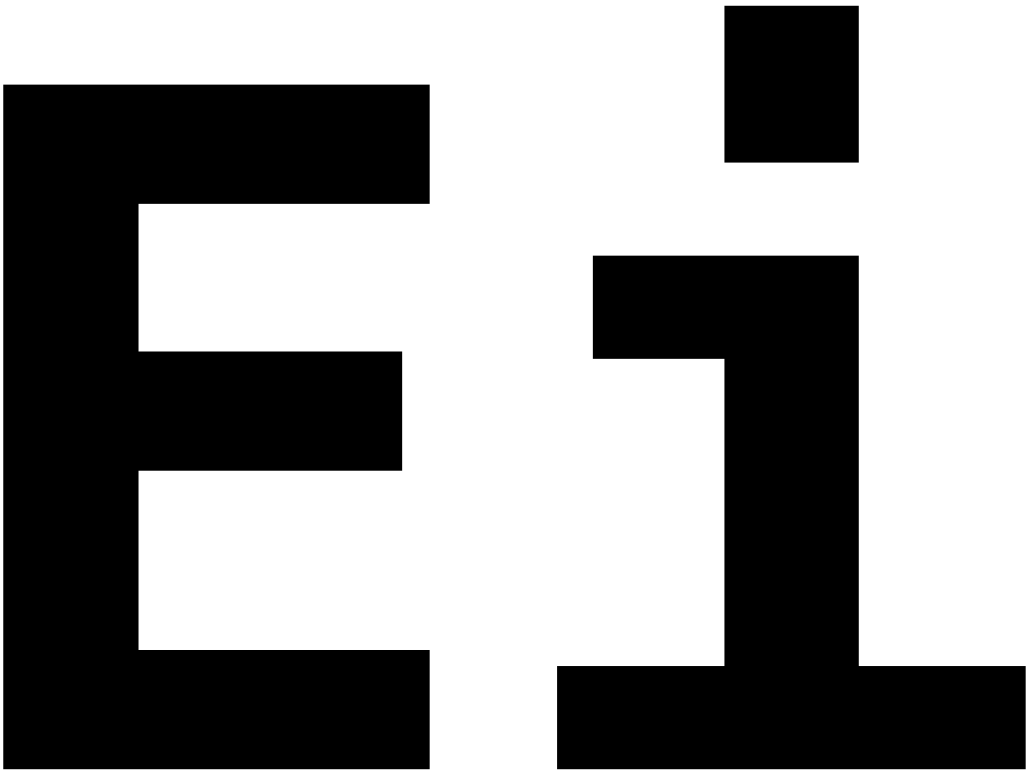
un

g

ei

ne

r




SZ

ei

t

na

ch

zu

VO



zi

eh

en

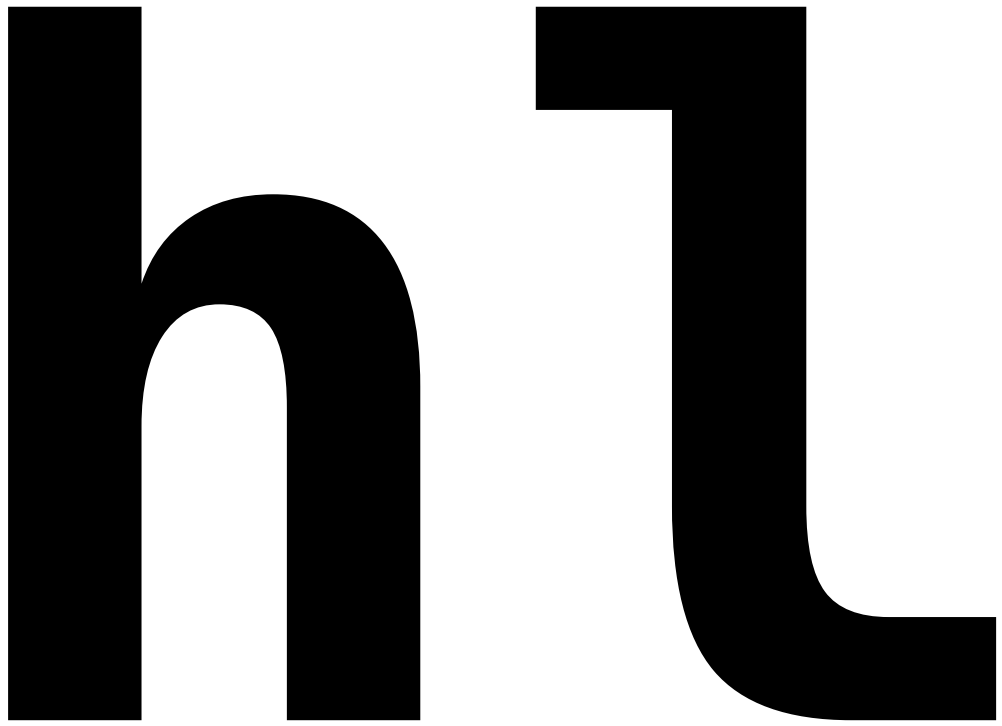
un

d

di

e

fe



en

de

Fä


hi


gk

ei

t

de

r

Mo

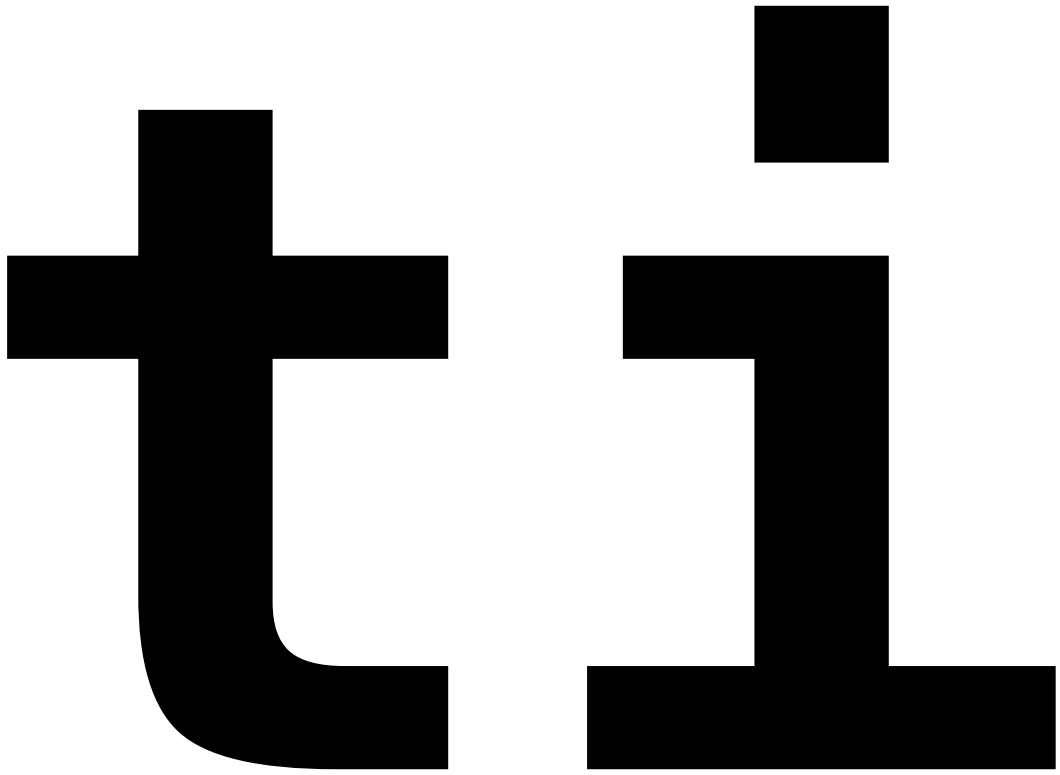
de



e,

wi

ch



ge

Rü

ck

ko

p p

lu

ng

en

zu

mo

de



ie

re

n,

ze


ig

en

al

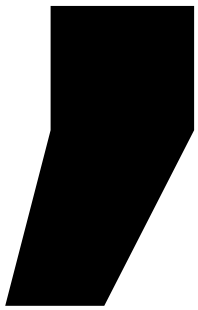


zu

sa

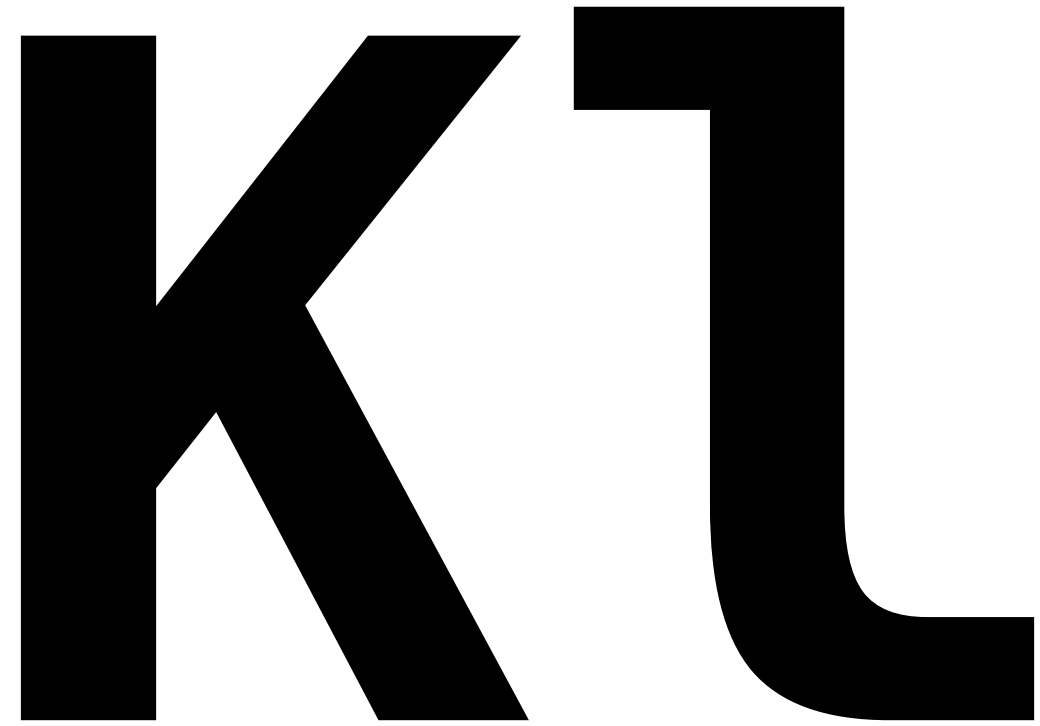
mm

en



da





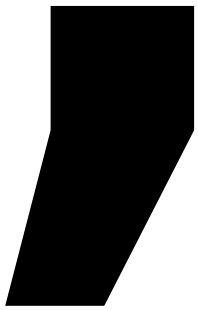



am

od

el





zu



nd

es

t

SO

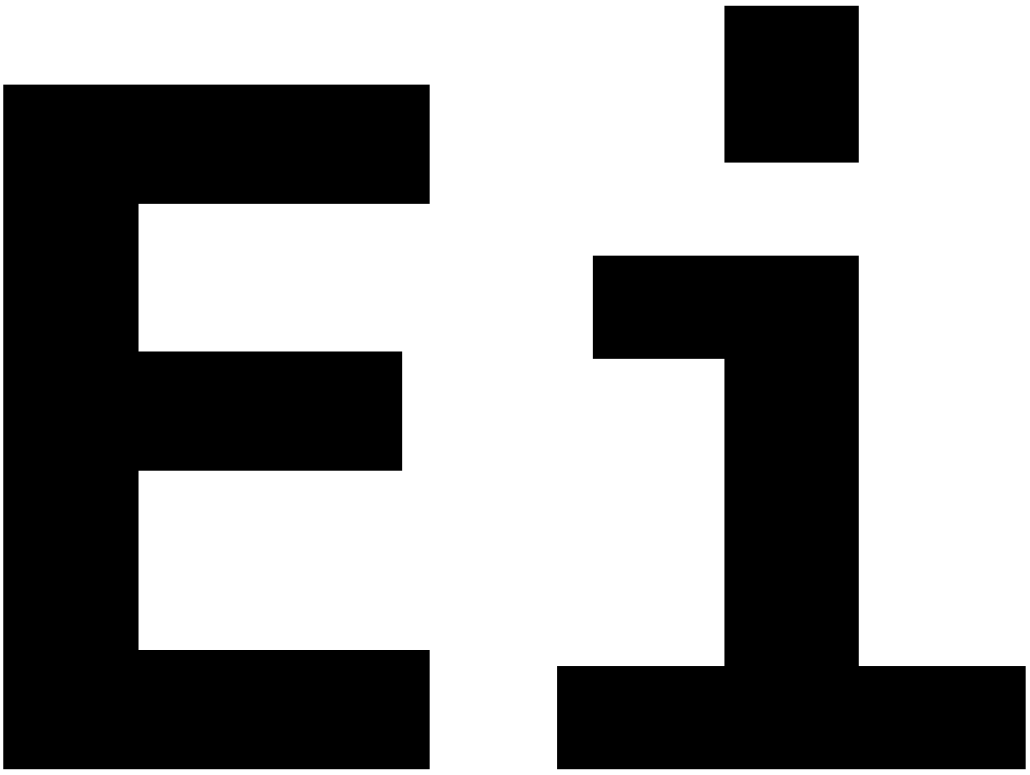

we


it

es

di

e




SZ

ei

te

n

be

tr


if





no

ch



de

n



nd

er

SC

hu

he

n

st

ec

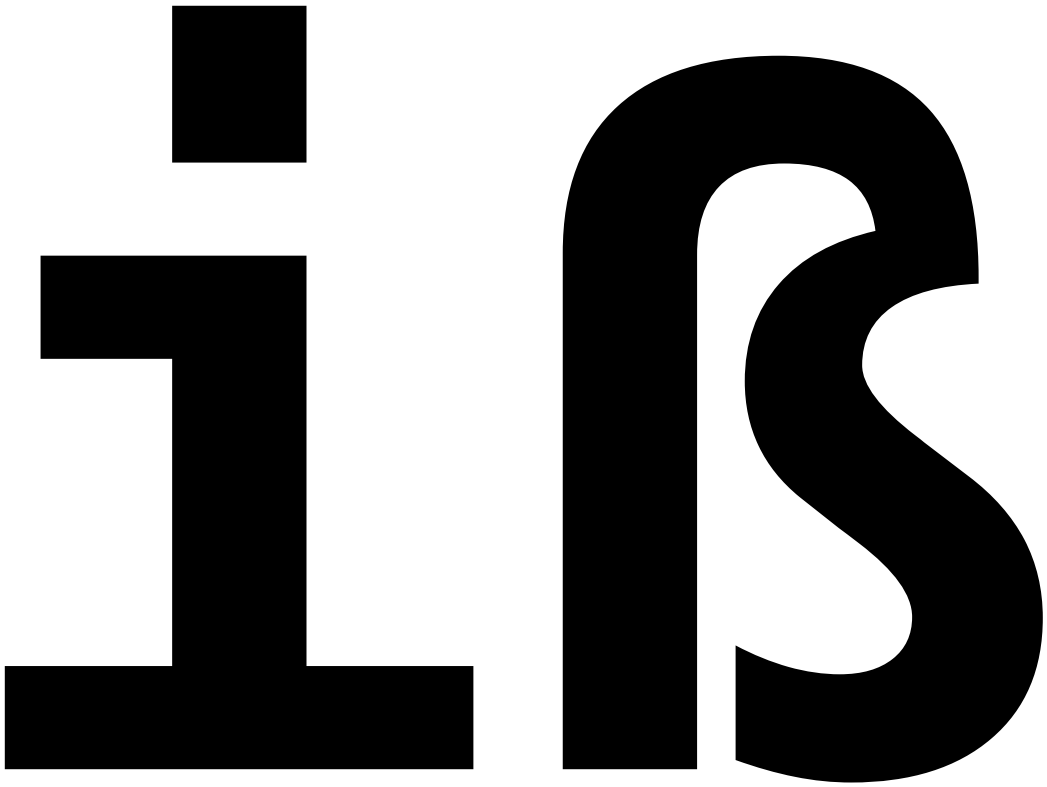

ke

n.

(D

as

he



t



ch

ţ,

da



sí

e



ch

t

au


sg

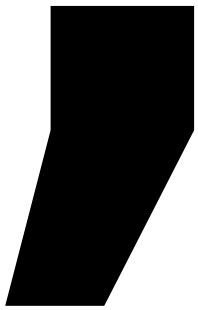
er

ei



sí

nd



SO

nd

er

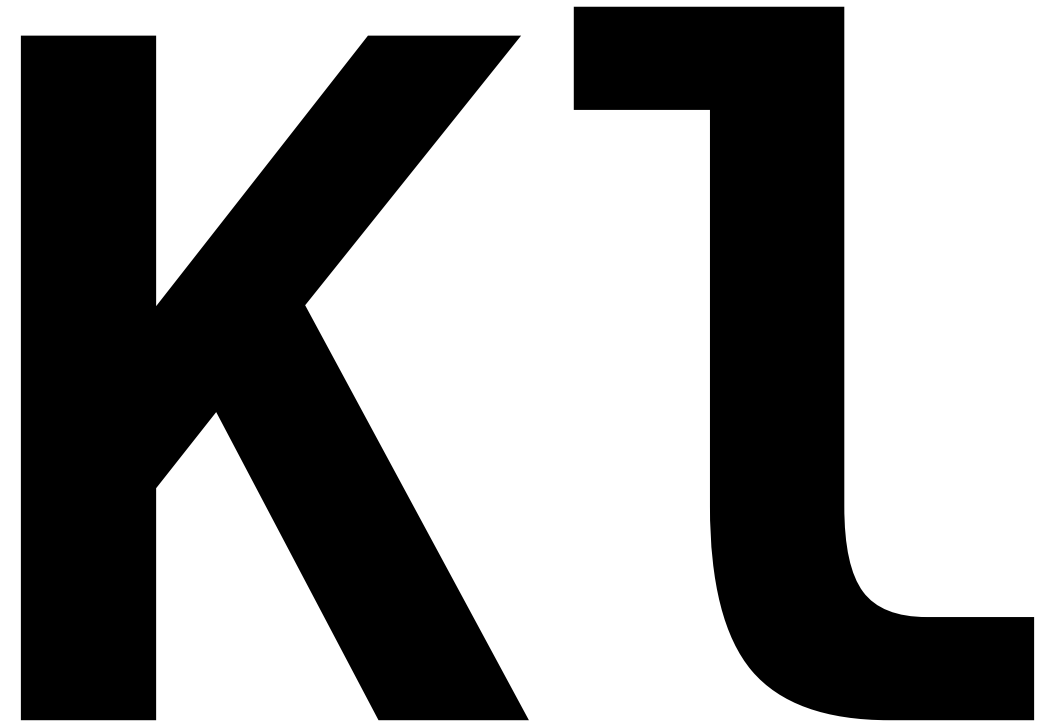
n

da



da

S





a

ei

n


we



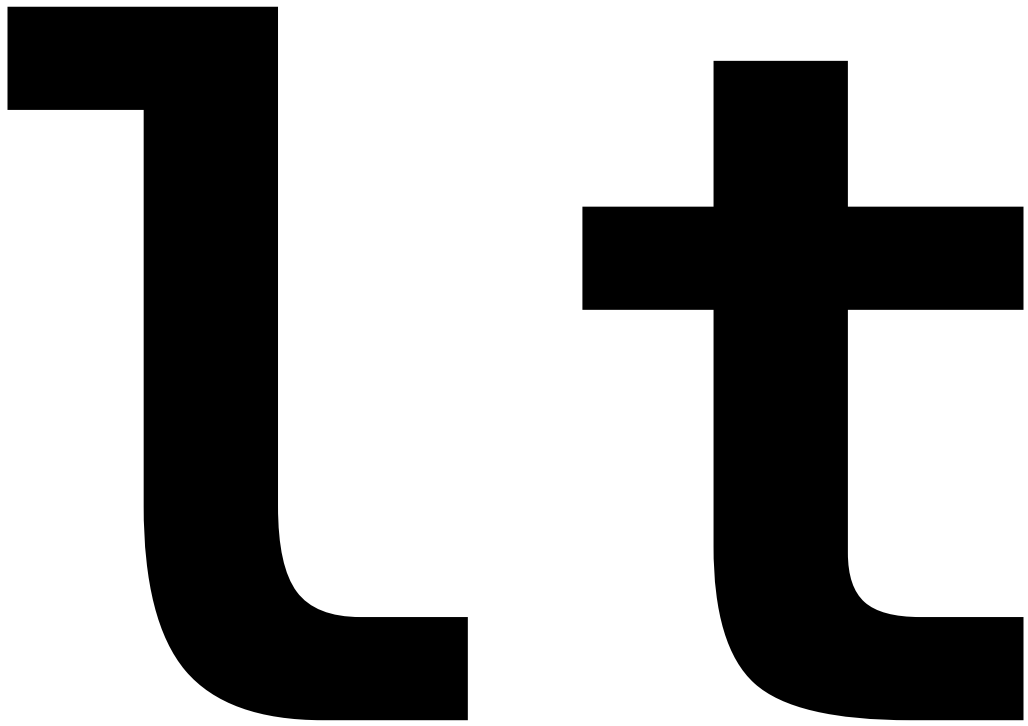
g


hi

nt

er

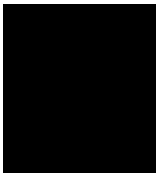
hä




ig

is

t)



An

me


rk

un

g



FA

MO

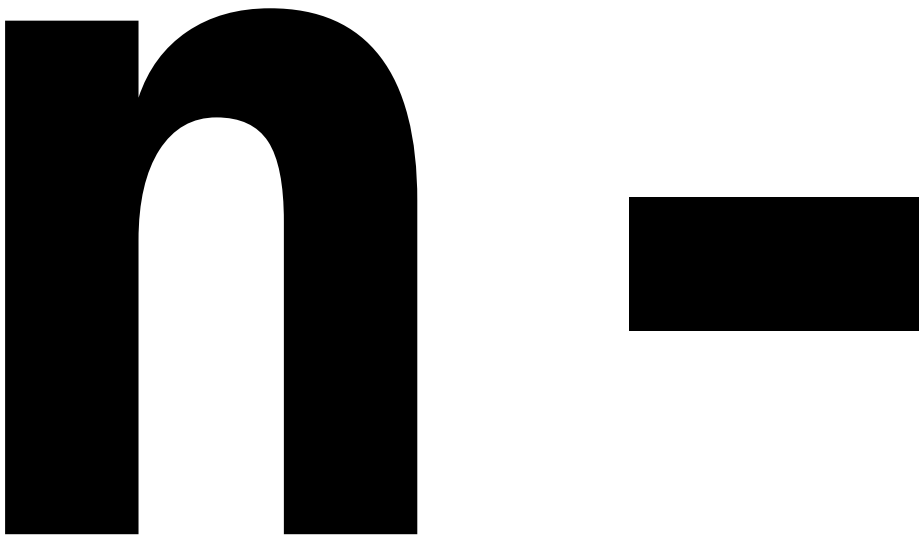
US

Di

e

0z

ea



Ko

mp

on

en

te

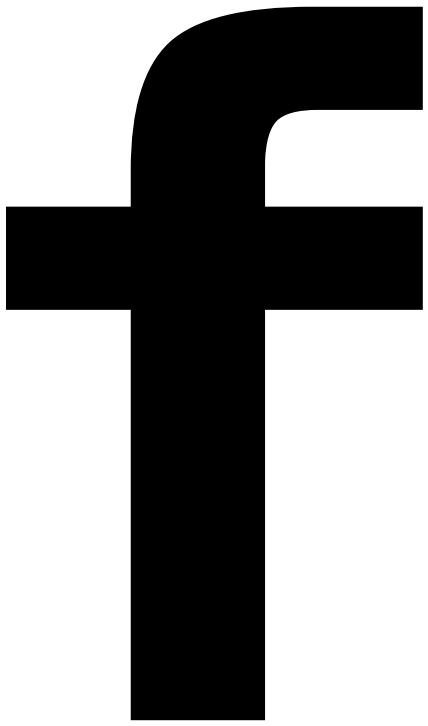
ba

sí

er

t

au



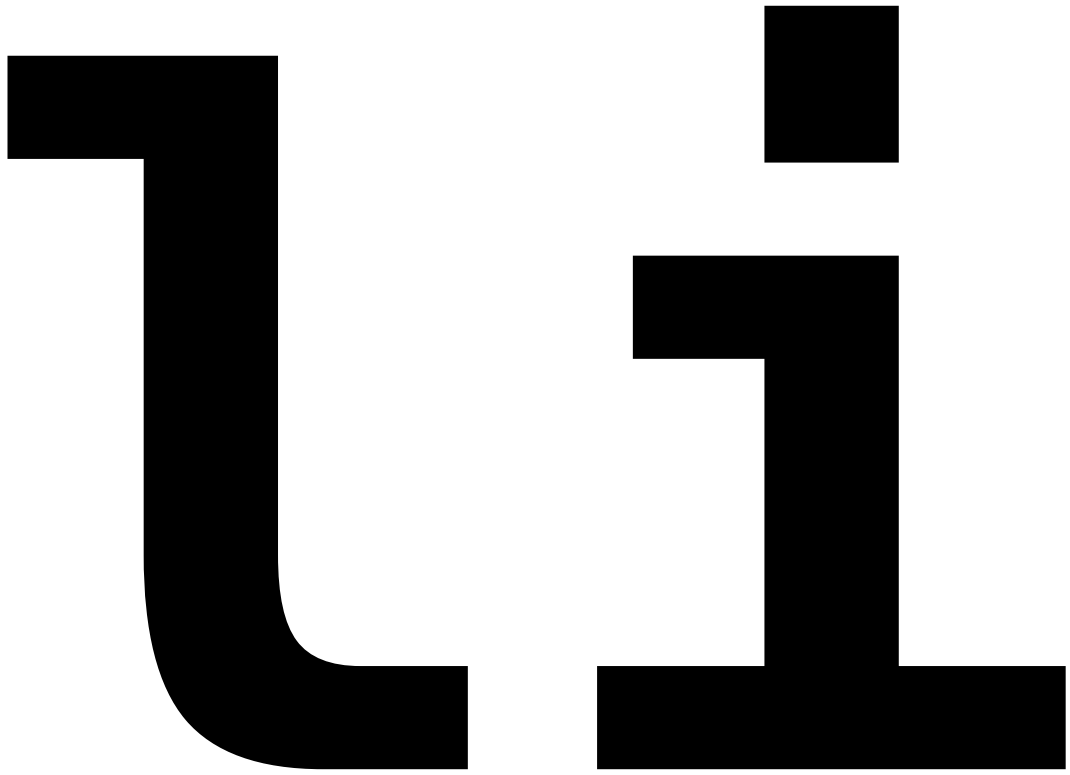
de

m



gi

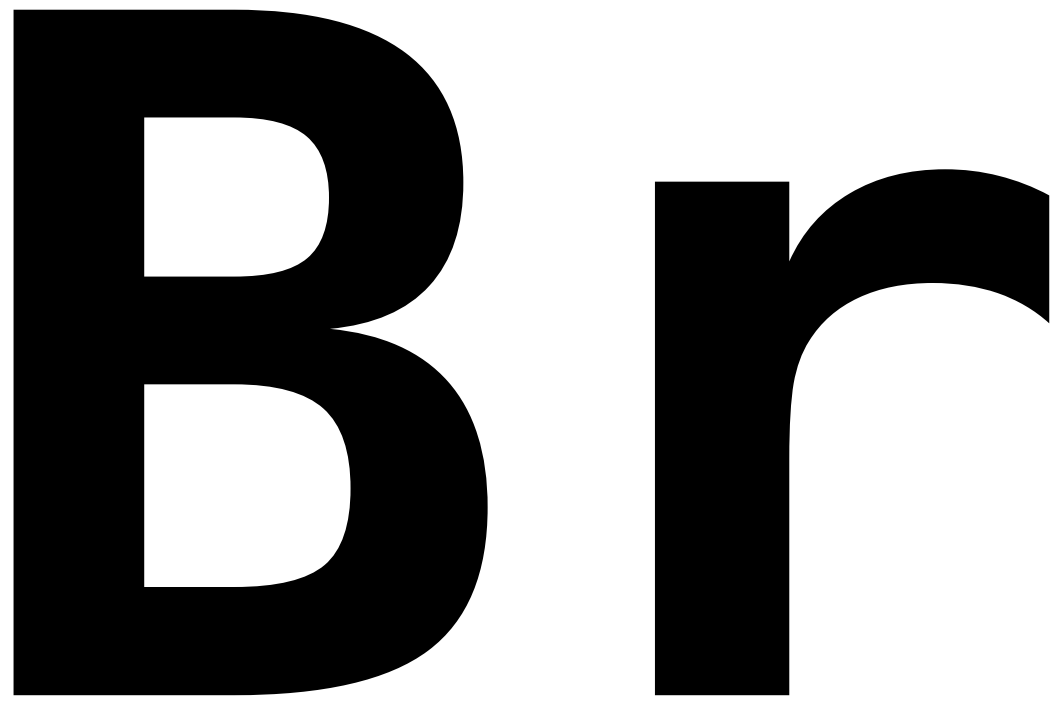
d –



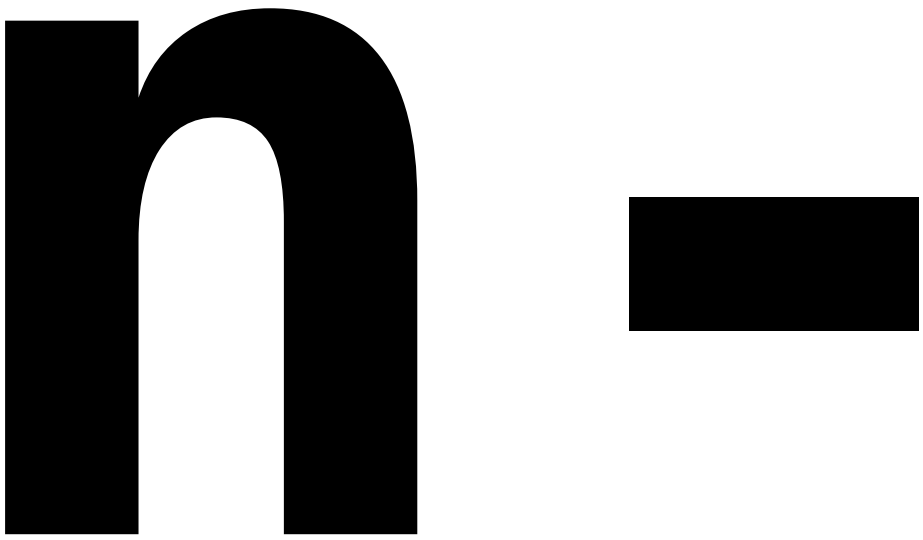
d

Co




Br

ya



Mo

de



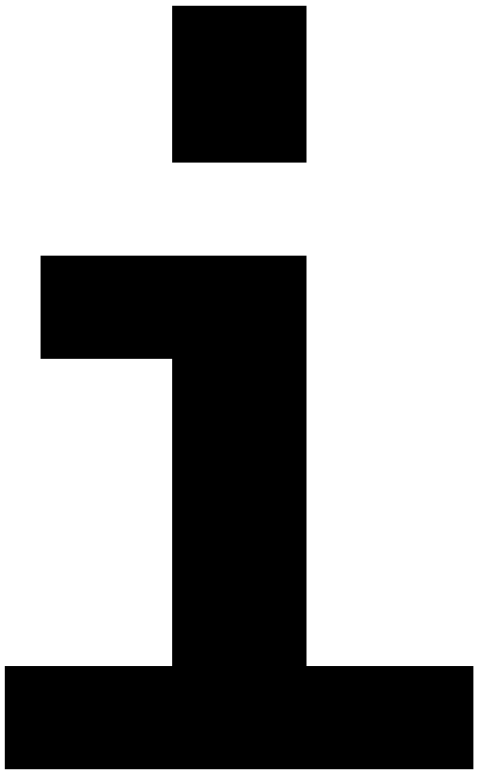
(P

ac

an

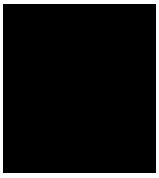
OW

sk



et

al



19

90

)

un

d


lä



t



t

ei

ne

r

Au





un

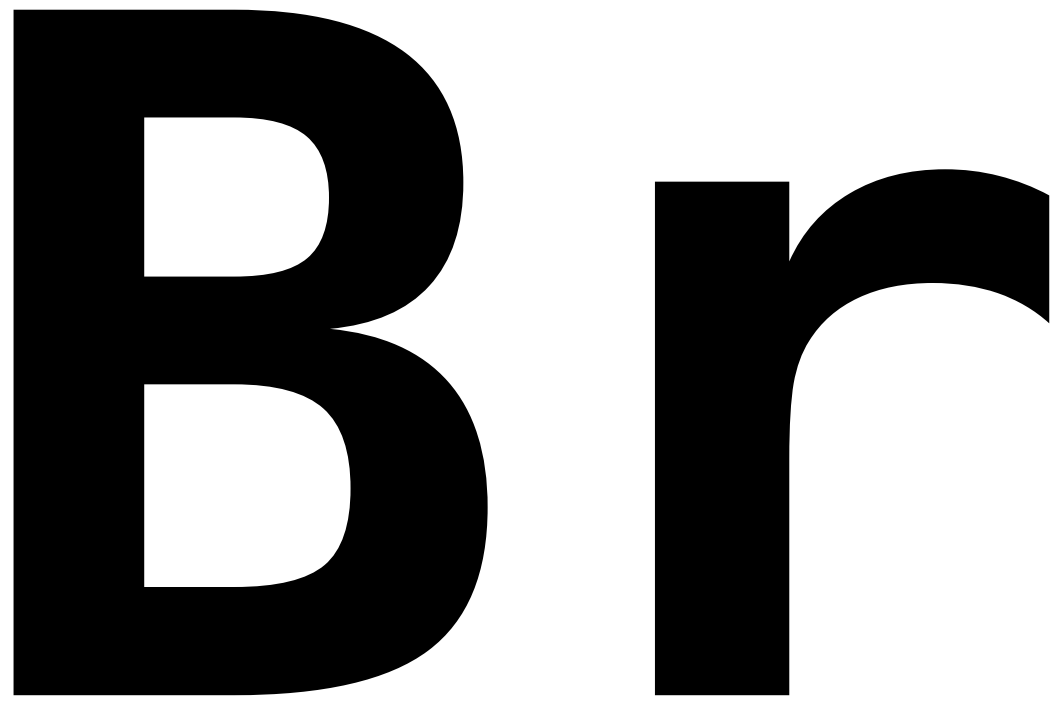
g

VO

n

2,

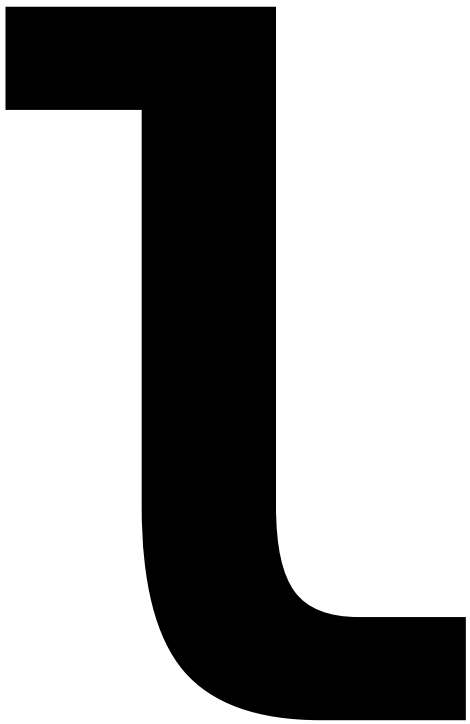
5°


Br

ei

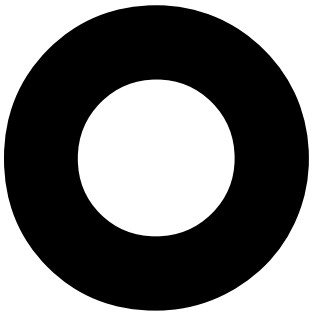
te

ma



3,

75



Lä

ng

e



t

20

ve

rs

ch

ie

de

ne

n

Sc


hi

ch

te

n.

Di

e


At

mo

sp

hä

re

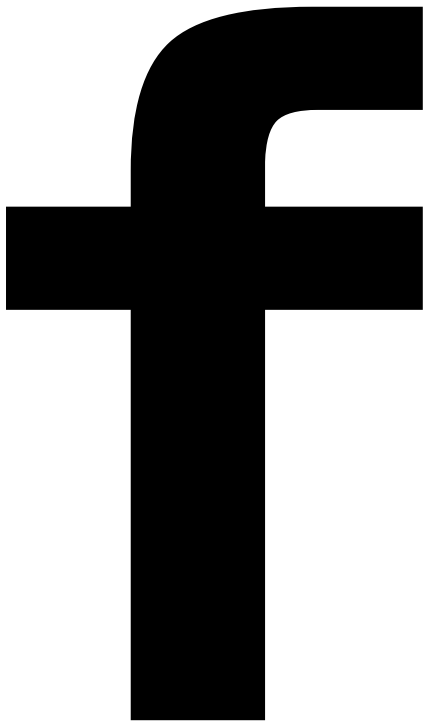
ba

sí

er

t

au



de

n

pr




it

iv

en

GL

ei

ch

un

ge

n



t

ei

ne

r

Au





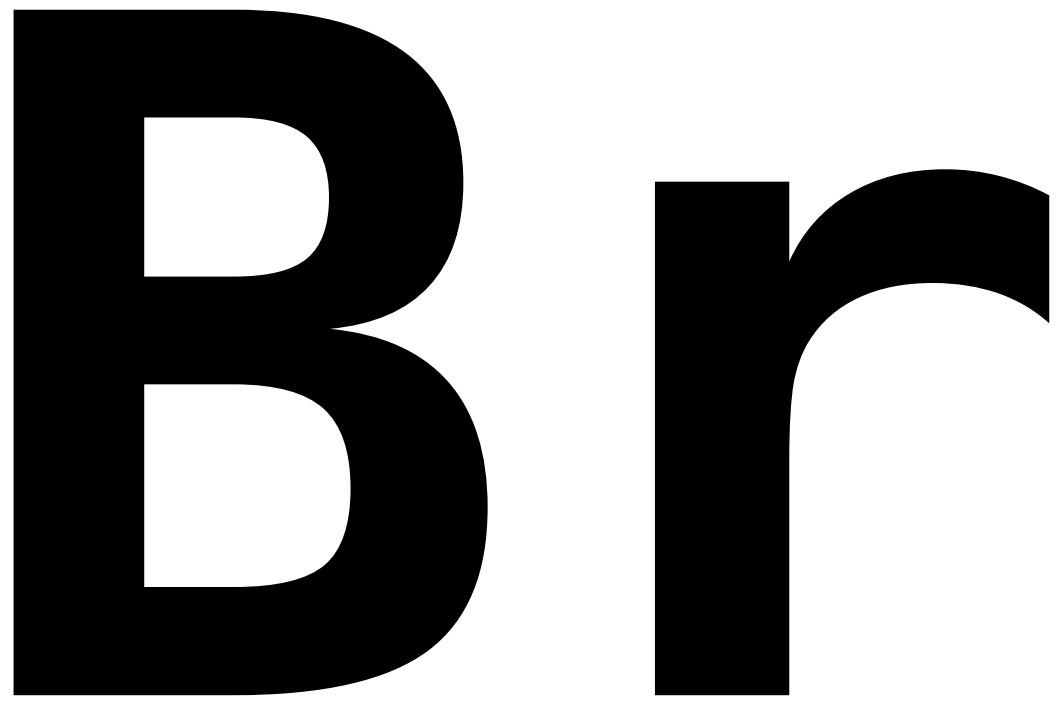
un

g

VO

n

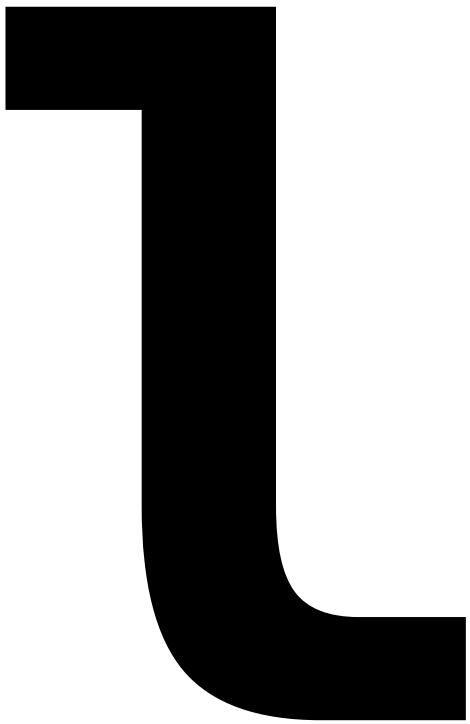
5°


Br

ei

te

ma



7,

5°

Lä

ng

e



t

11

ve

rs

ch

ie

de

ne

n

Sc


hi

ch

te

n.

Di

e

XD

BU

A-

Ve

rs

io

n

VO

n

FA

MO

US

(h

ie

rn

ac

h

ei



ac

h

FA

MO

US

ge

na

n n



sí

eh

e

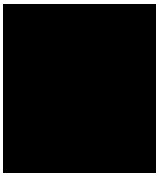

Sm


it

h

et

al



20

08

)

ha

t

ei

n

VO



nd

us

tr

ie



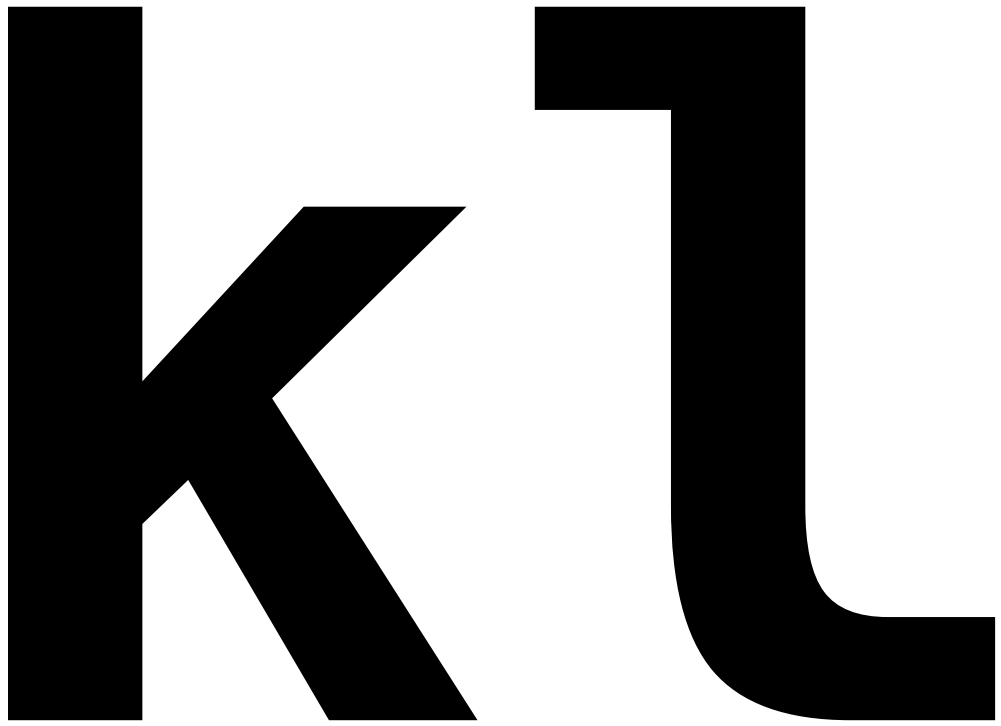
es

Ko

nt

ro







a,

da

S



ge

ei

gn

et

er

we

is

e

de

m

VO

n

Ha


dC

МЗ

gl

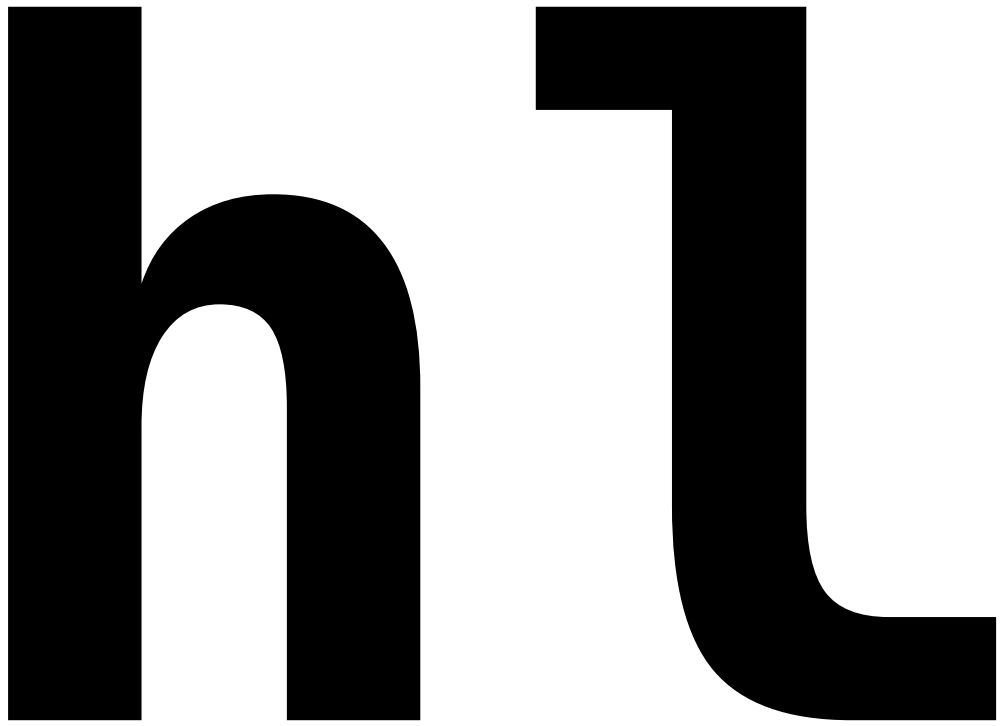
ei

ch

ţ,

ob

WO



FA

MO

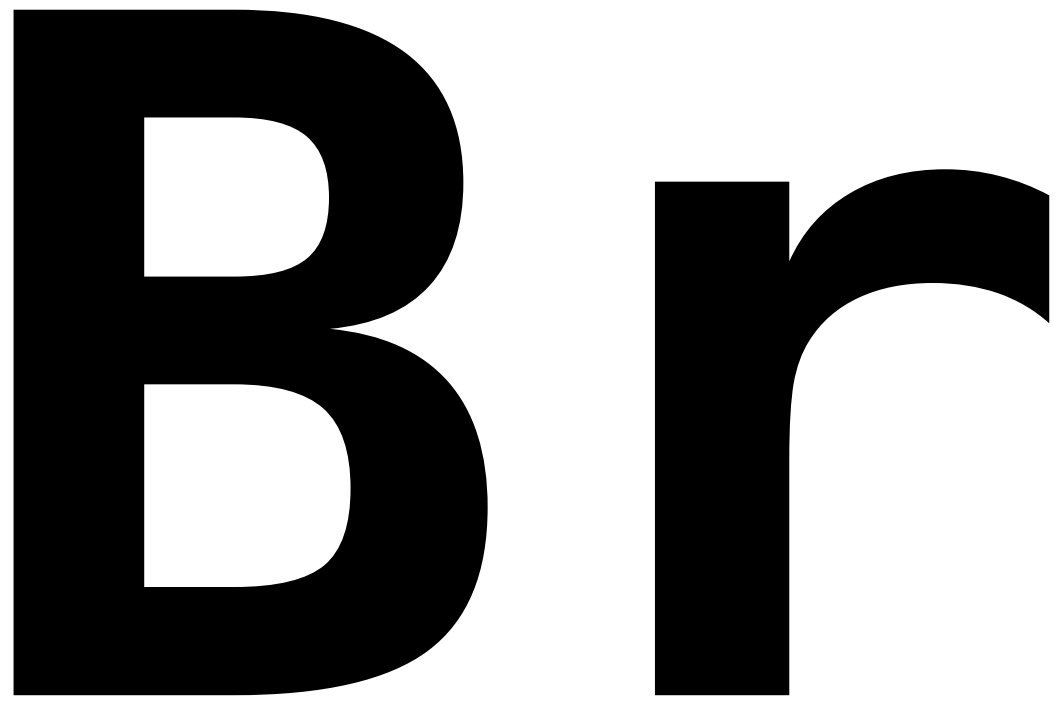
US



ho

he

n


Br

ei

te

n

de

r

No

rd

he



sp

hä

re





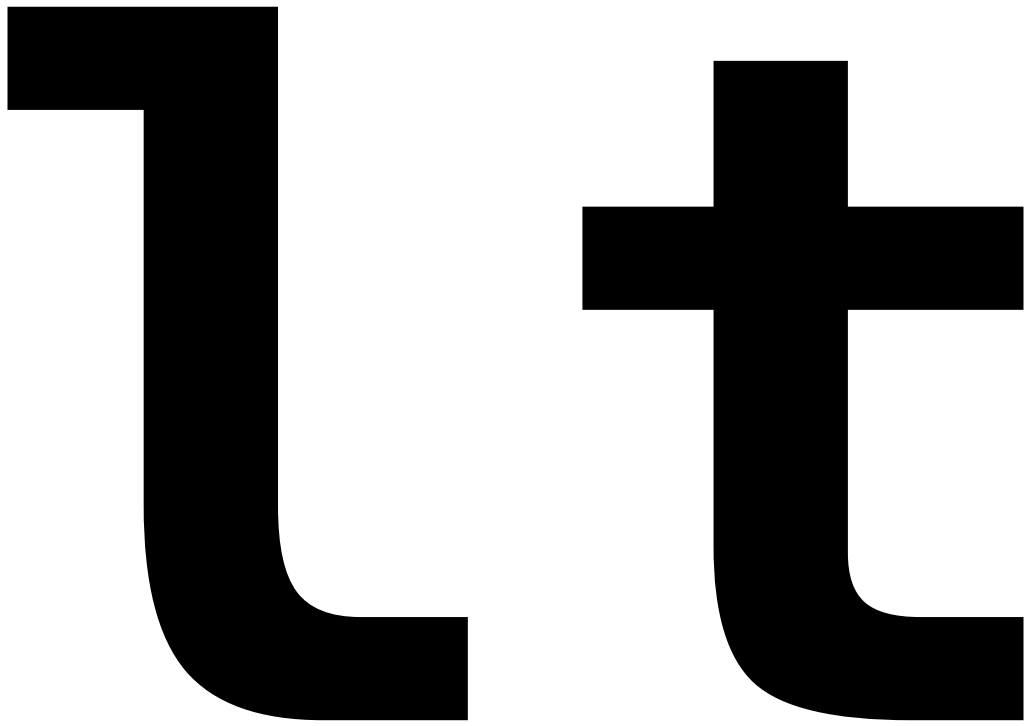
nt

er

ei

ne

Ka





Ve

rz

er

ru

ng

VO

n

et

wa

5°

C

au



ei

st



Ve

rg





h

zu

Ha


dC

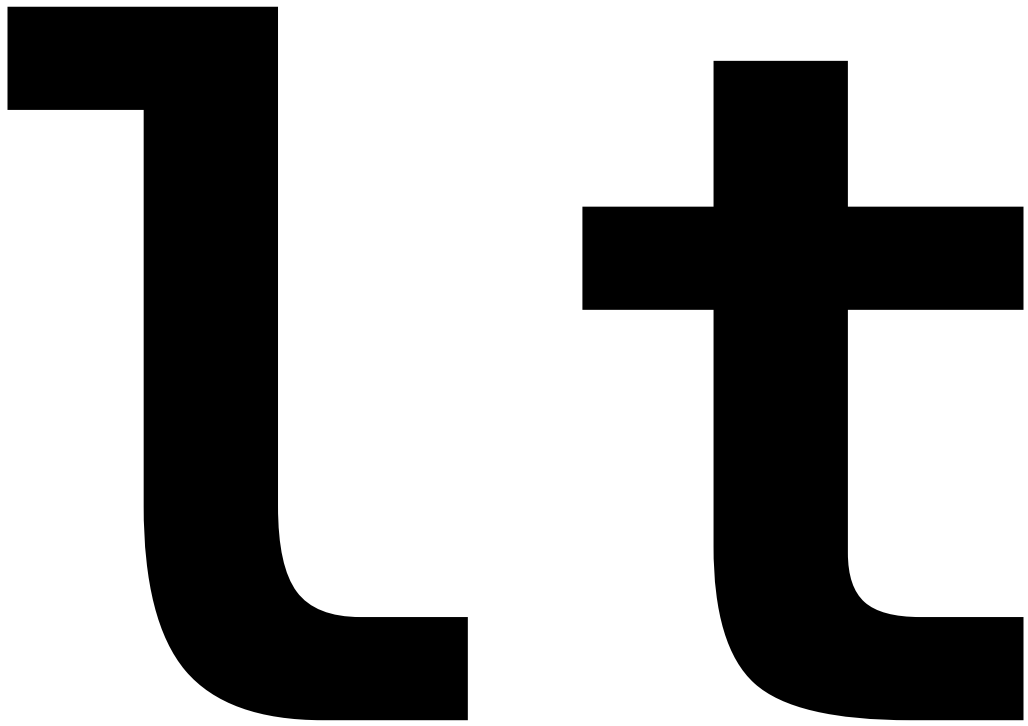
МЗ

(g

em

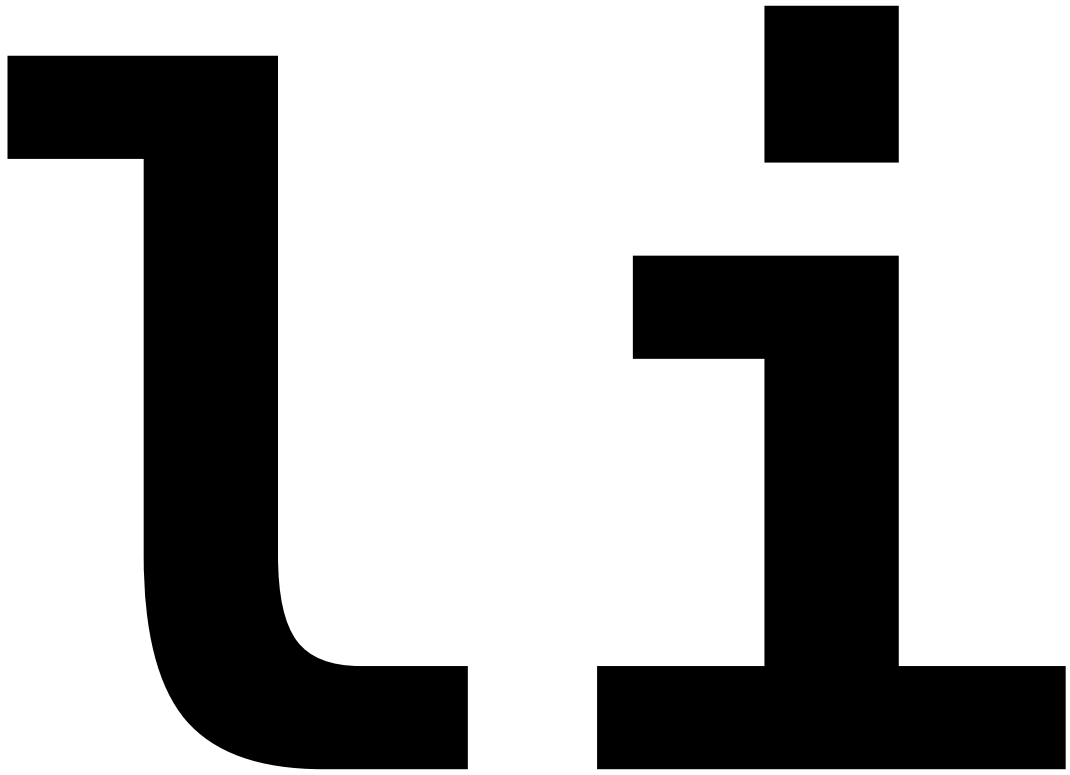

it

te





rd



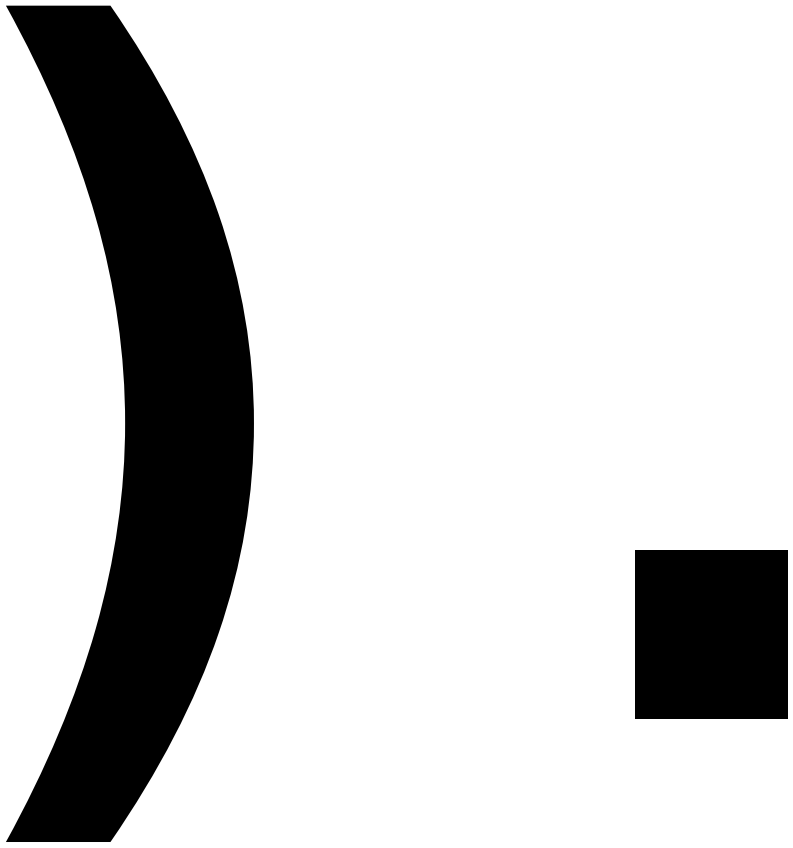
ch

VO

n

40

° N



AL

S

Fo



e

wi

rd

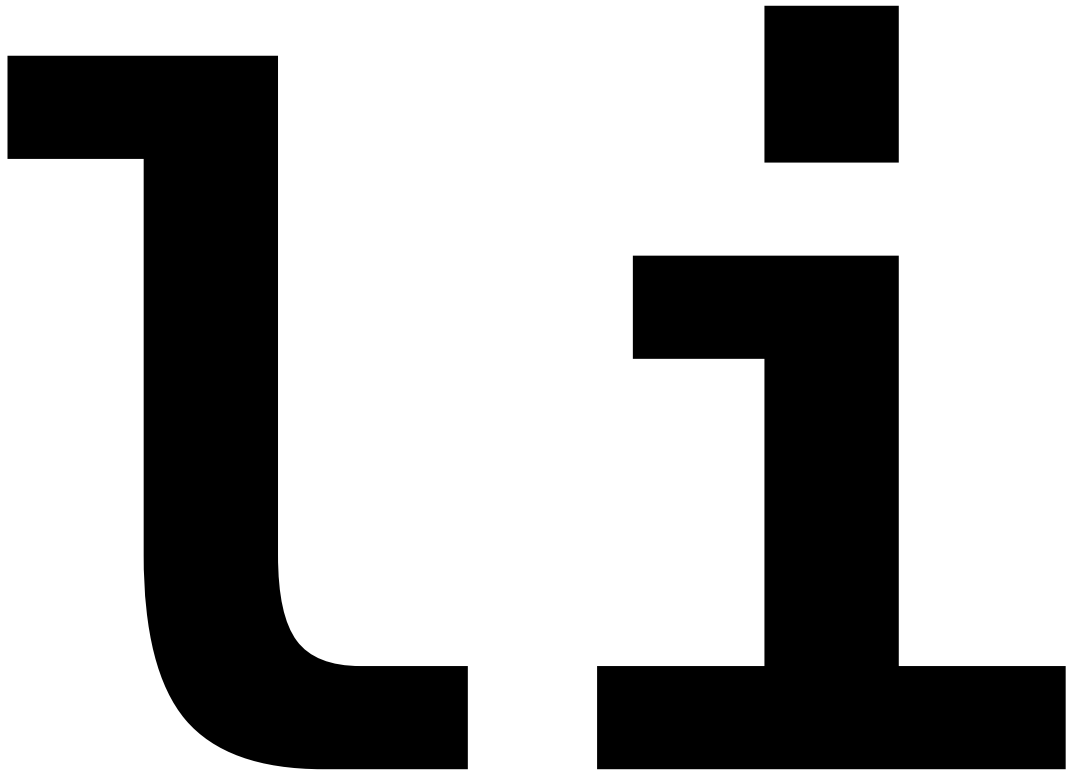
di

e

wi

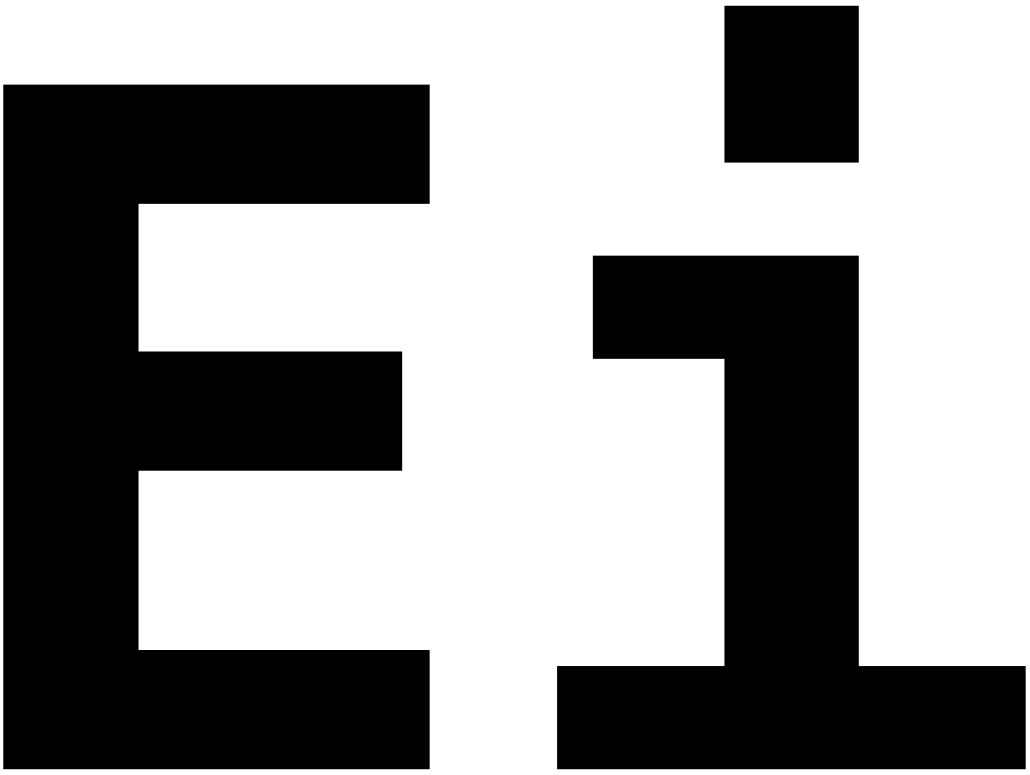
nt

er



ch

e



sa

us

de



un

g



No

rd

at


la

nt




üb

er

SC

hä

tz

t.

Di

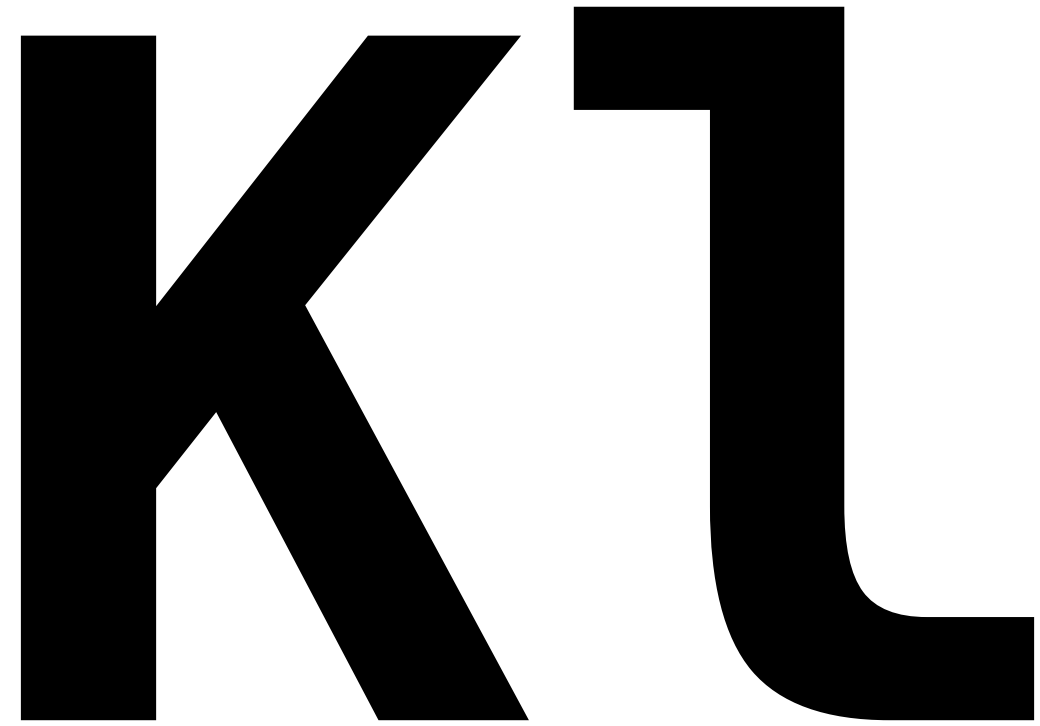
e

gl

ob

al

e

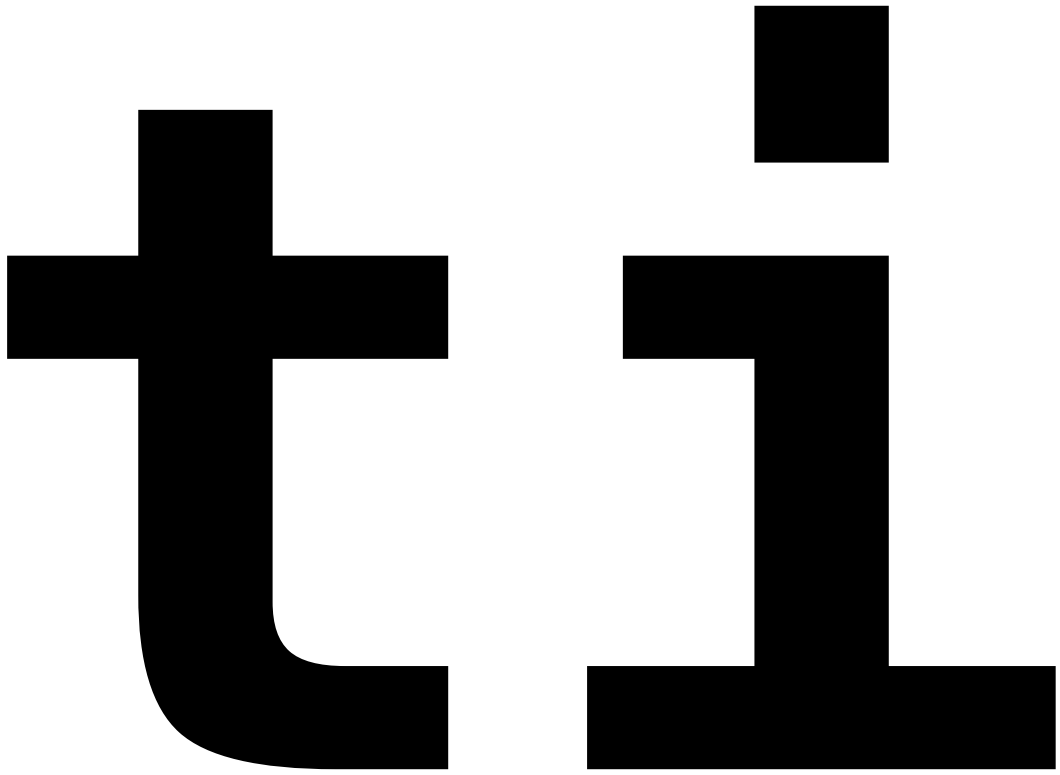




as

en

sí



vi

tä

t

VO

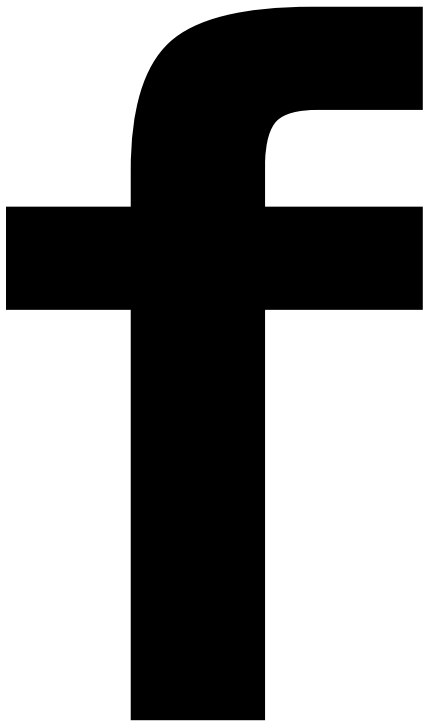
n

FA

MO

US

au



ei

ne

Zu

na



e

de

S

at

mo

sp

hä



SC

he

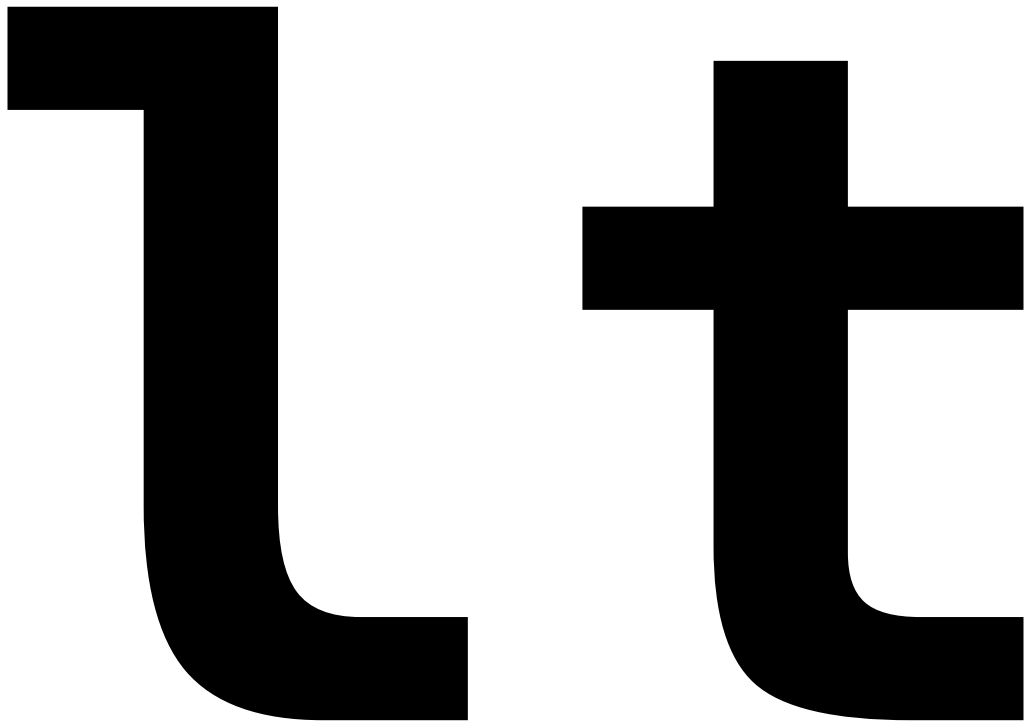
n

CO

2-

Ge

ha



es

je

do

ch

is

t


äh





h

de

r

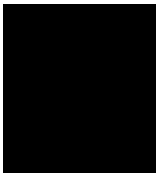
VO

n

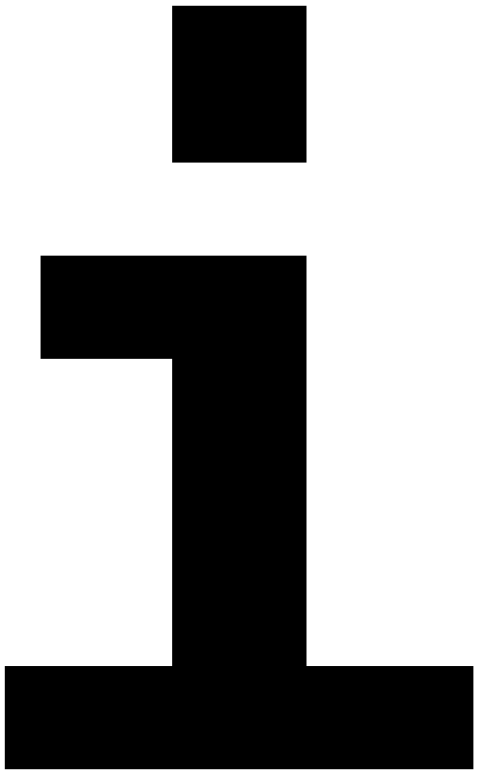
Ha


dC

МЗ




Be



FA

MO

US

gi

bt

es

ei

ne


Re



e

VO

n

Un

te

rs

ch

ie

de

n



Ve

rg





h

zu

Ha


dC

МЗ



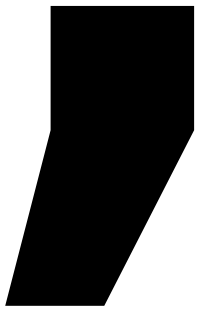
t

de

m

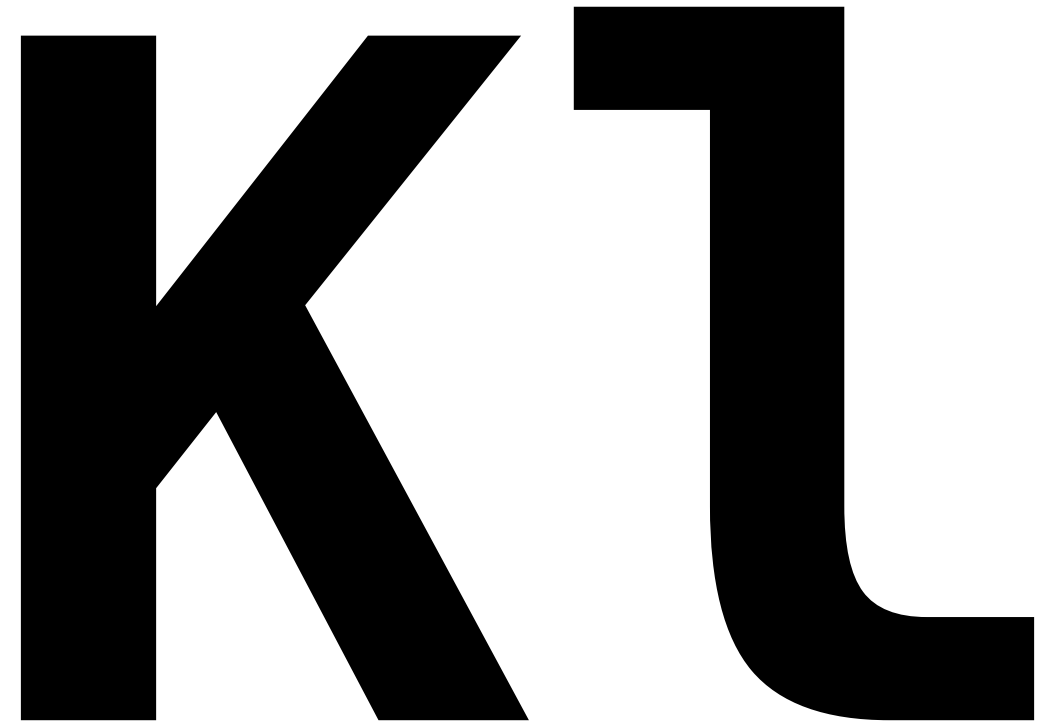
zi

el



di

e





as





at

io

n

zu

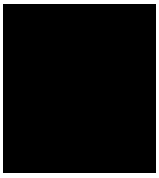
ve

rb

es

se

rn



So

wu

rd

e

zu

m


Be

is

pi

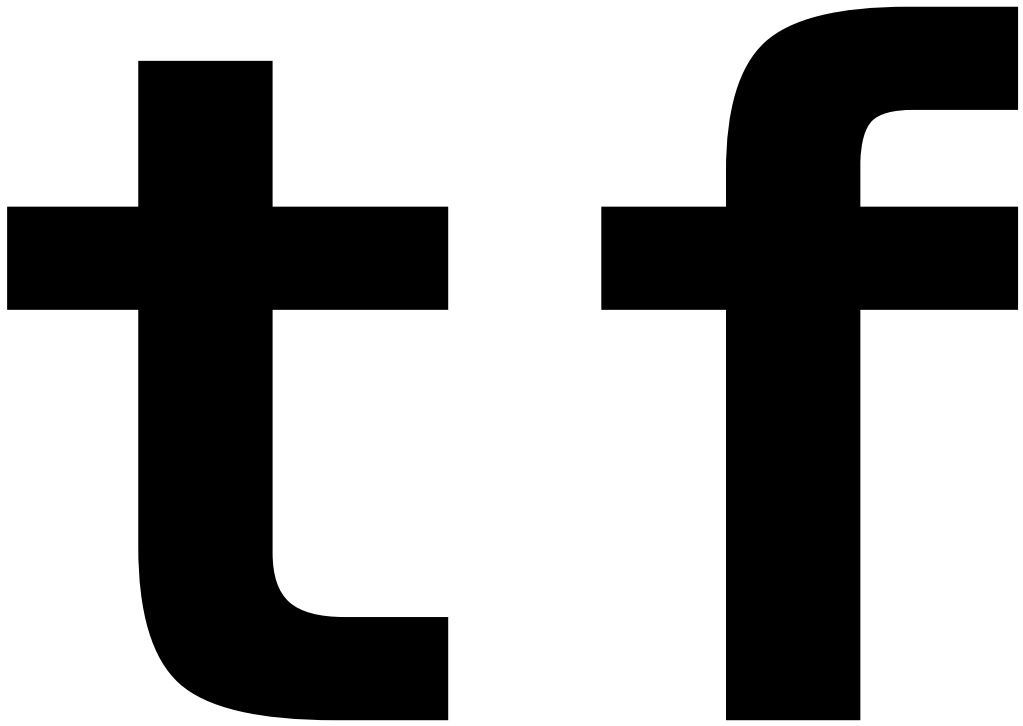
el

Is


la

nd

en



er

nt

(J

on

es

20

03

),

um

ei

ne

n

st

är


ke

re

n


wä


rm

et

ra

ns

po


rt



No

rd

at


la

nt



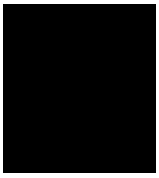
zu

er

zi

el

en




Sm


it

h

un

d

Gr

eg

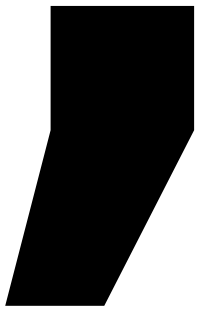
or

y

ze


ig

en



da



di

e

Se

ns


it

iv


it

ät

de

r


At


la

nt



me



di

on

al


OV

er

t u

rn



g


ci

rc



at

io

n

(A

MO

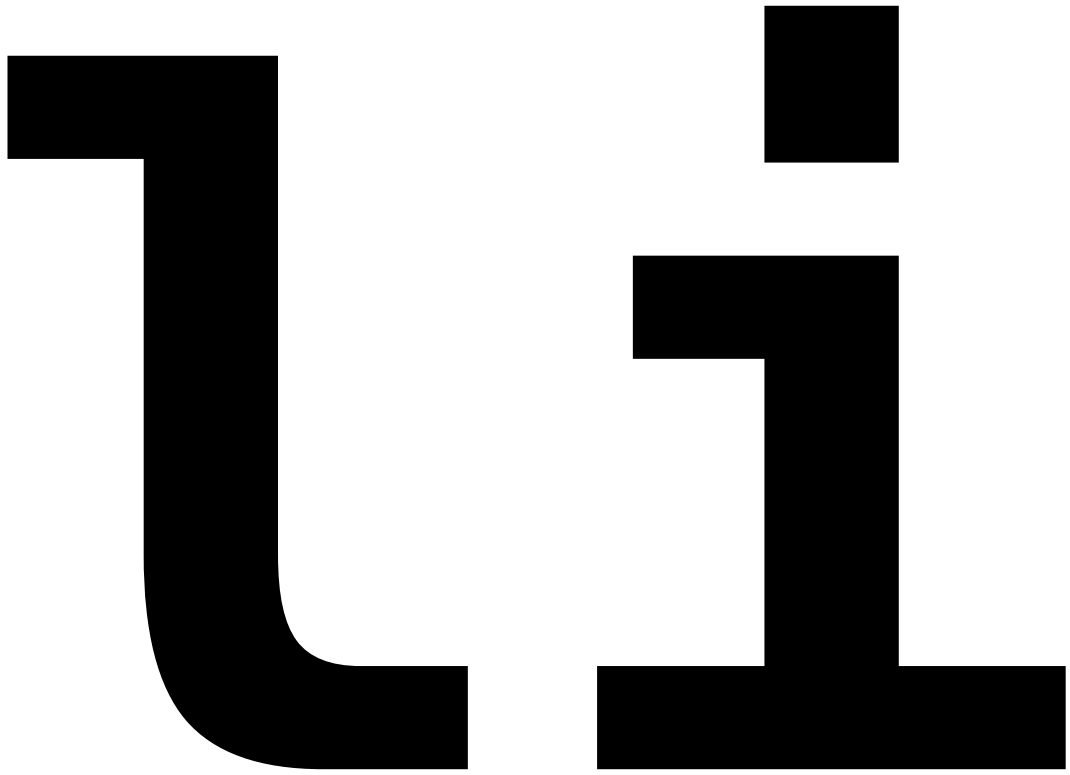
c)


hi

ns




ht



ch

st

ör

un

ge

n



di

es

er

Ve

rs

io

n

VO

n

FA

MO

US

et

wa



de

r

Mİ

tt

e

de

r

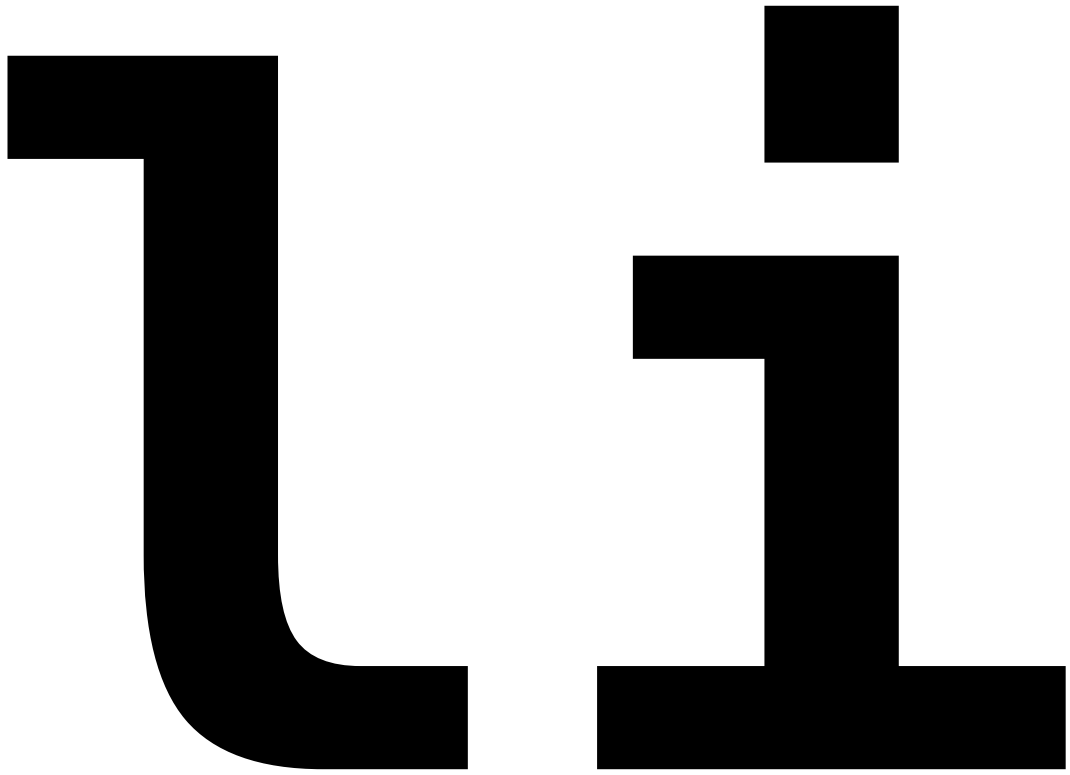
Ba

nd

br

ei

te



eg

t



Ve

rg





h



t

vi

el

en

an

de

re

n

ge

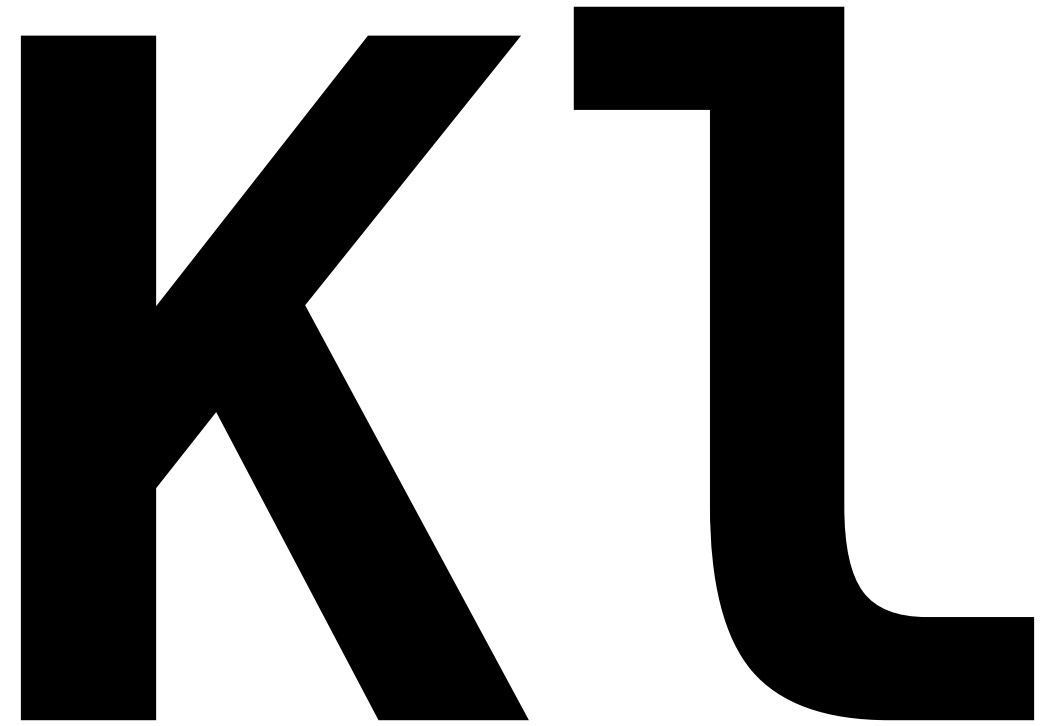
ko

p p

el

te

n






am

od

el



n.

Da

S



di

es

er

st


u d

ie

ve


rw

en

de

te

Mo

de



un

te

rs

ch

ei

de

t

sí

ch

VO

n

XD

BU

A

FA

MO

US

da

du

rc

h,

da




ZW

ei

te

ch



SC

he

Bu

gs



Co

de

fe

st

ge

ma

ch

t

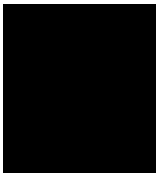
WO

rd

en

sí

nd





ü s

se

VO

n


la

te

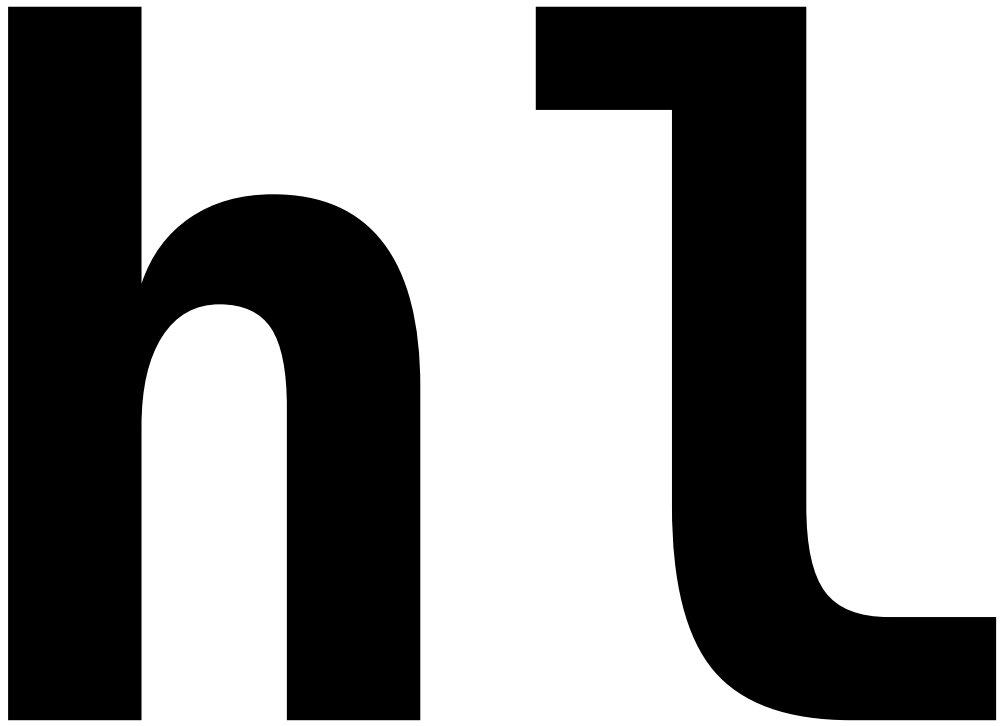
nt

er

un

d

fü



ba

re

r


wä


rm

e

au

S

de

m

0z

ea

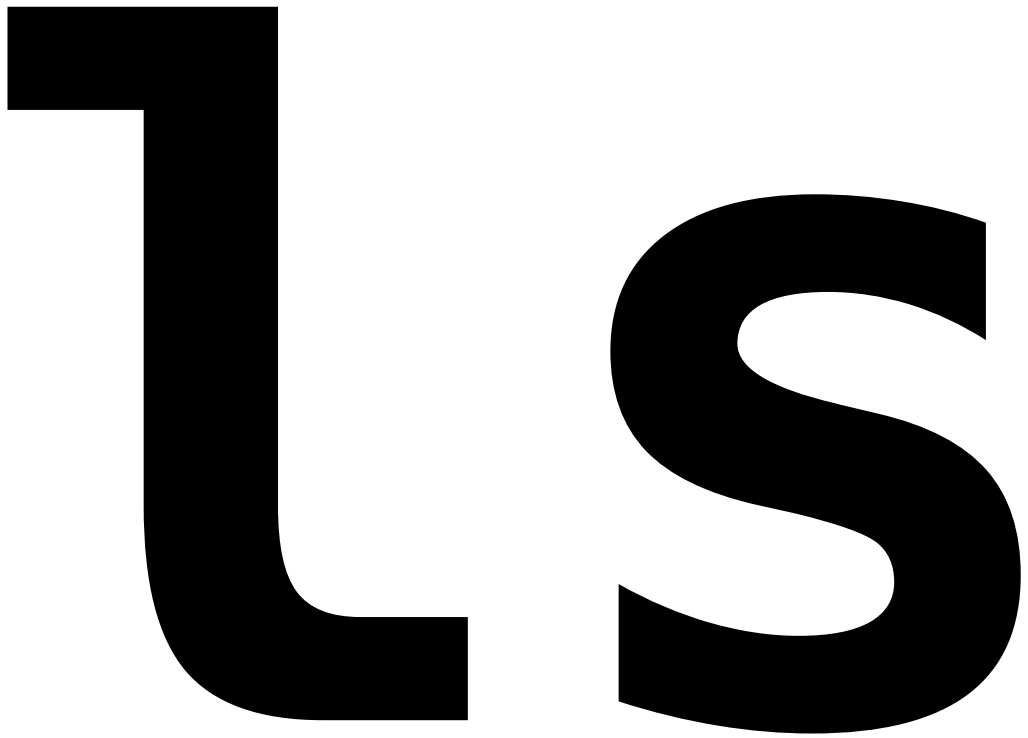
n

wu

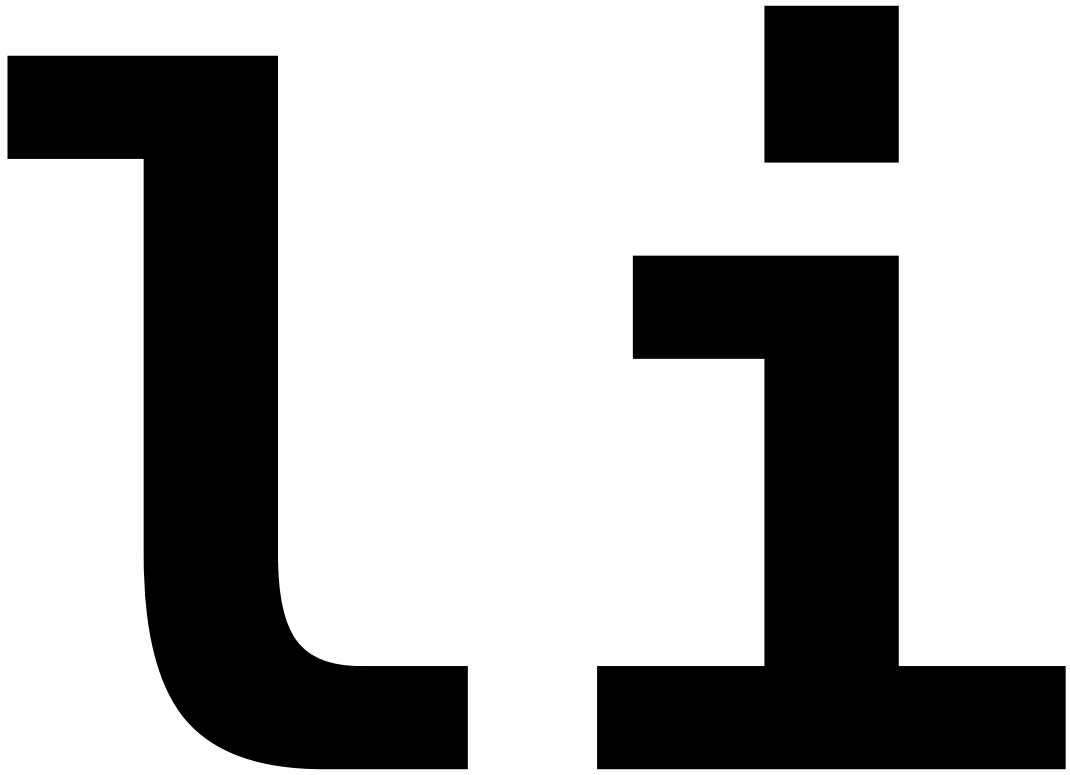
rd

en

fä



ch



ch

al

S

Te



de

r

Ko

p p

lu

ng



Ro

ut



e

an

ge

se

he

n,

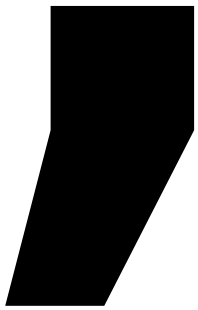
un

d

Sc



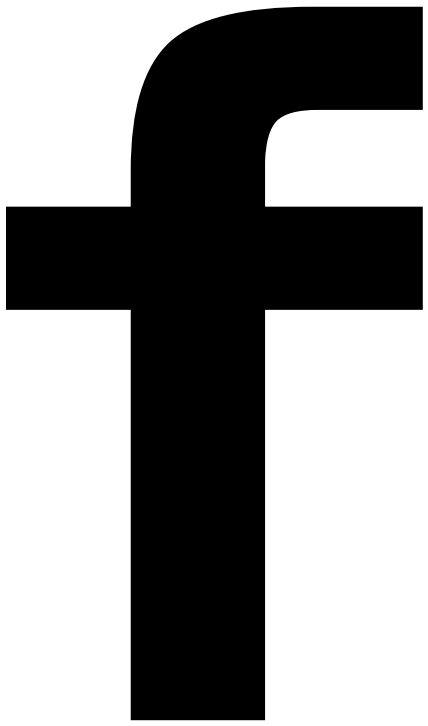
ee



de

r

au



Me

er

ei

S

an

Kü

st

en

fä



ţ,

is

t

de

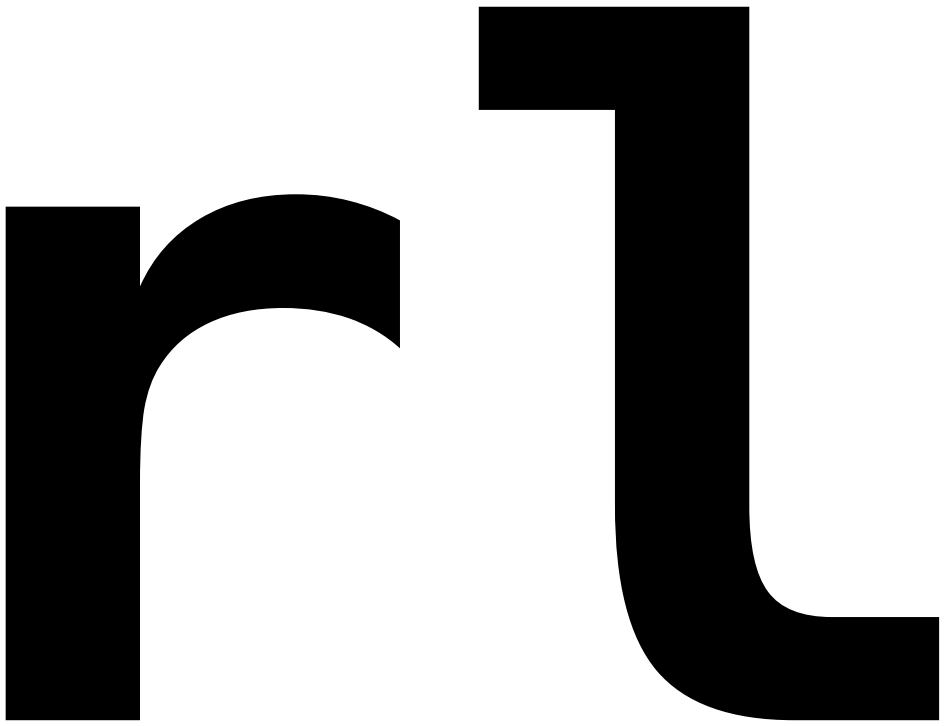
m

Mo

de



ve



or

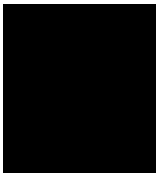
en

ge

ga

ng

en



Di

e

Ko

rr

ek

t u

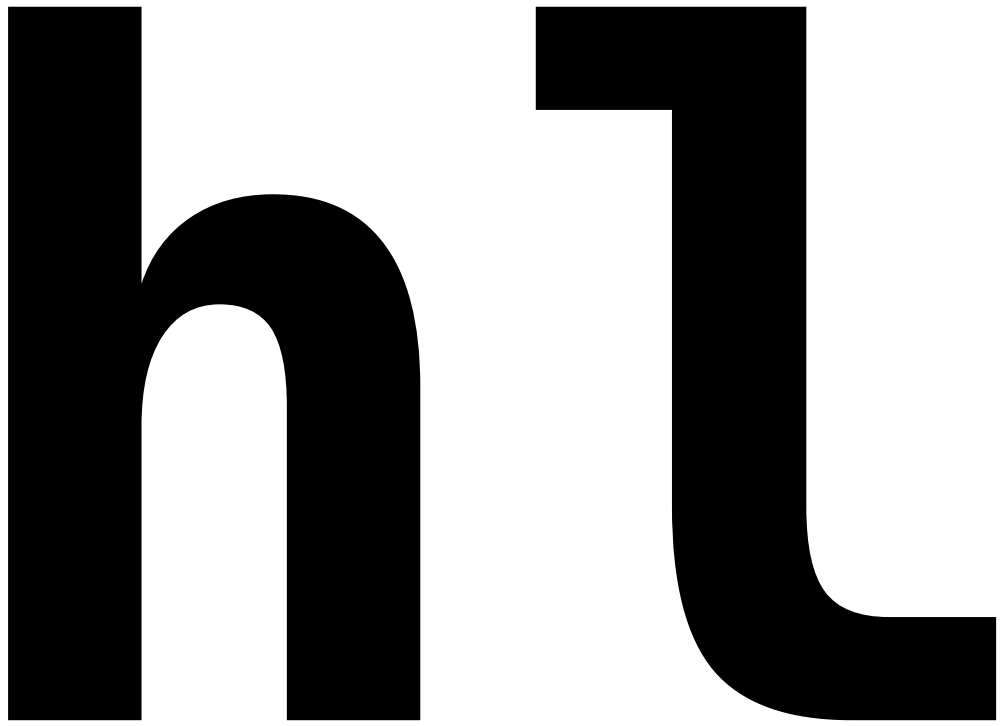
r

di

es

er


Fe



er

fü

hr

te

zu

ei

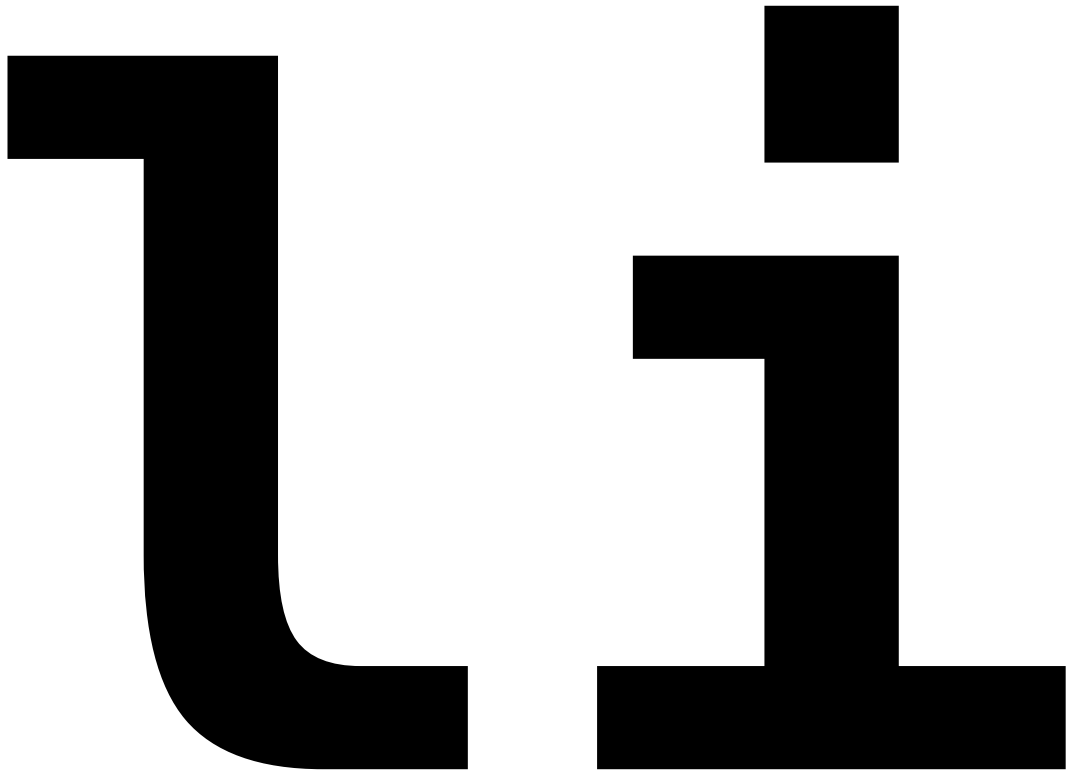
ne

r

zu

sä

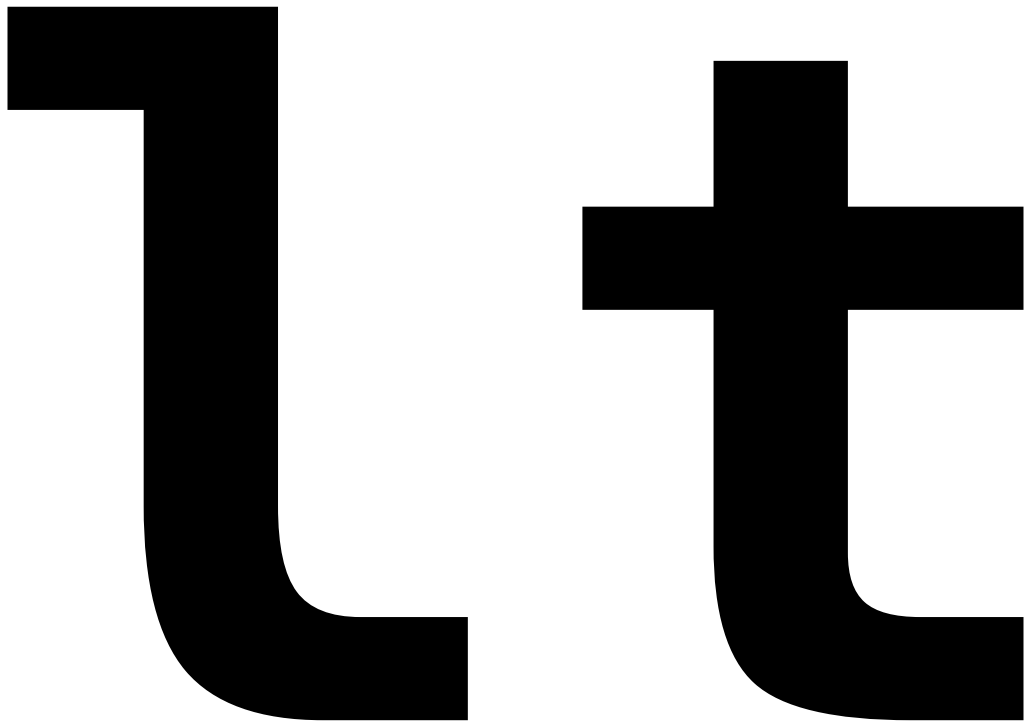
tz



ch

en

Ka





Ve

rz

er

ru

ng

VO

n

ei

ne

m

Gr

ad

od

er

SO



Kü

st

en

ge

bi

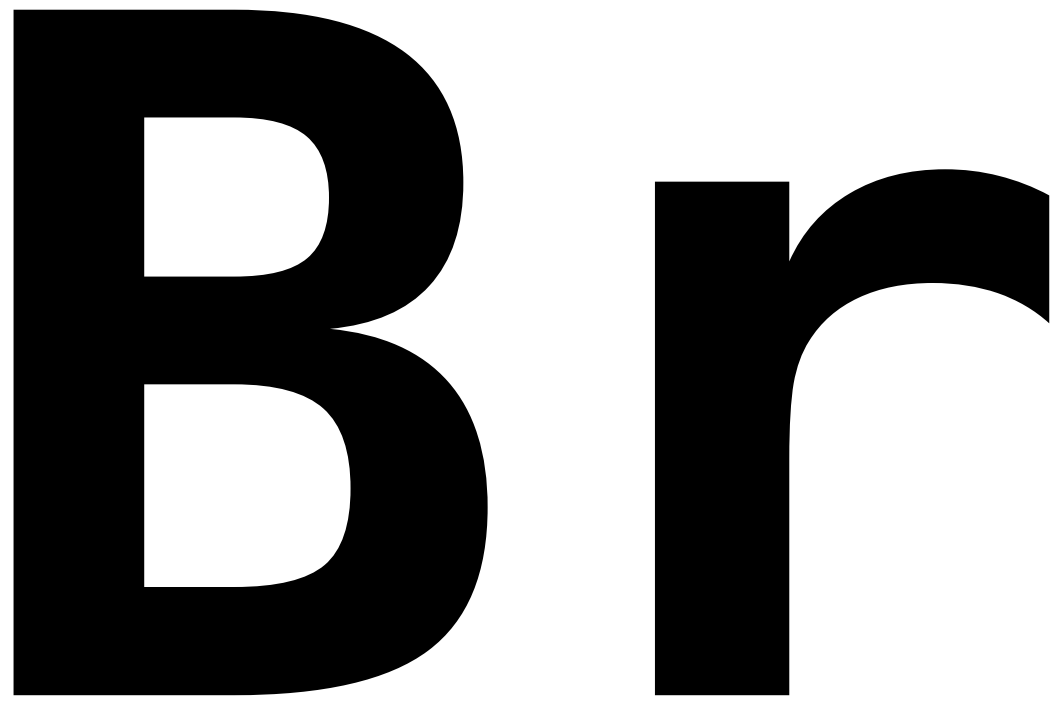
et

en

ho

he

r


Br

ei

te

n

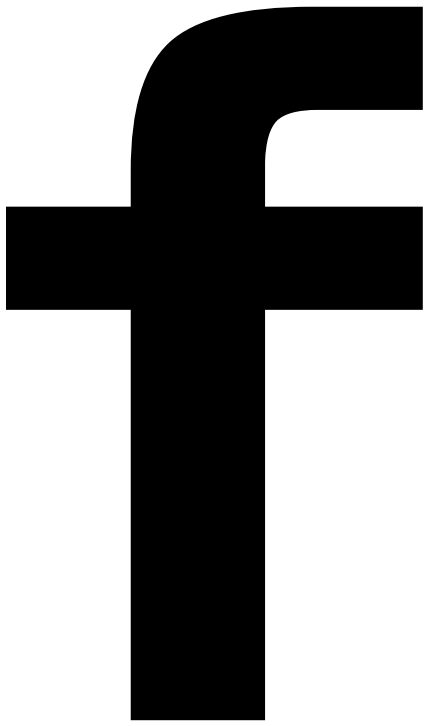



Be

zu

g

au



XD

BU

A,

do

ch

ga

b

es


ke

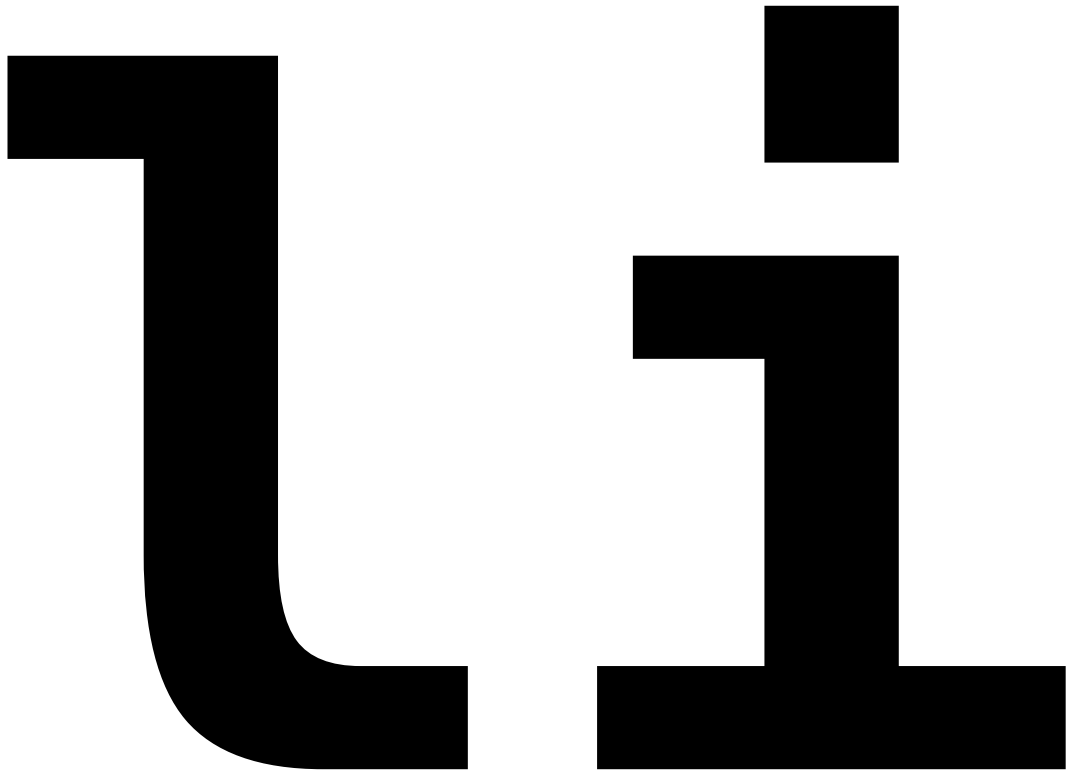


e


we

se

nt



ch

en



de

ru

ng

en

de

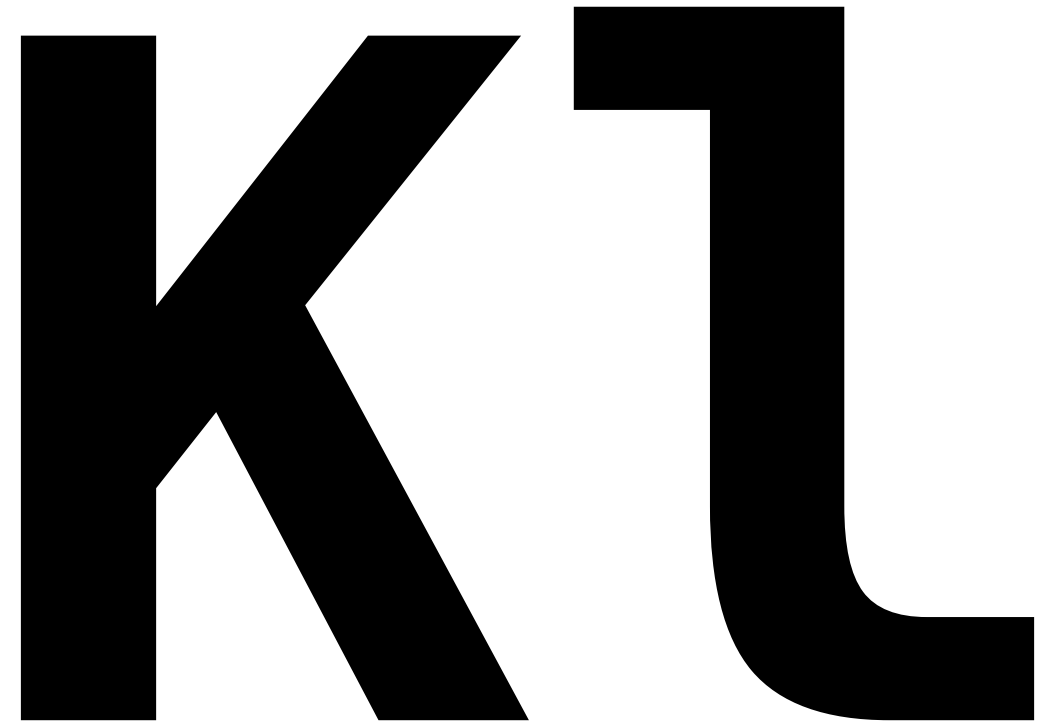
r

Mo

de







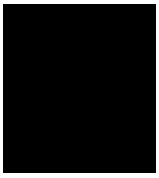


at

ol

og

ie



Au



rd

em

wu

rd

e

di

e

gr

un



eg

en

de

To

po

gr

ap


hi

e

de

S


Fe

st


la

nd

es



di

es

en

Lä



en

au

S

de

n

mo

de

rn

en

we

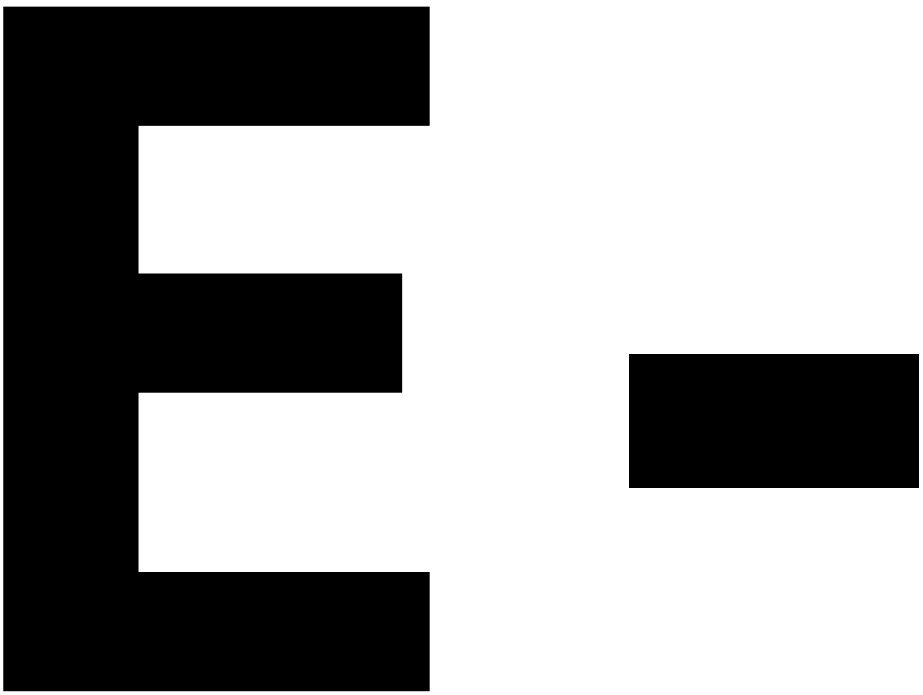

rt

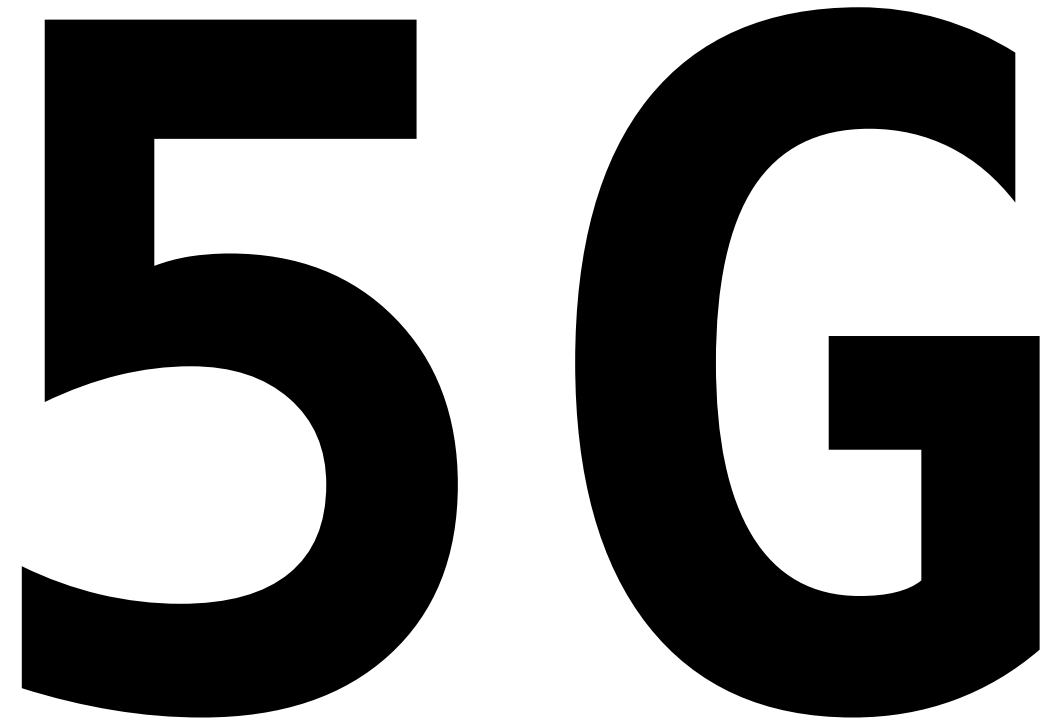
en

de

S

IC




5G



Da

te

ns

at

ze

S



te

rp

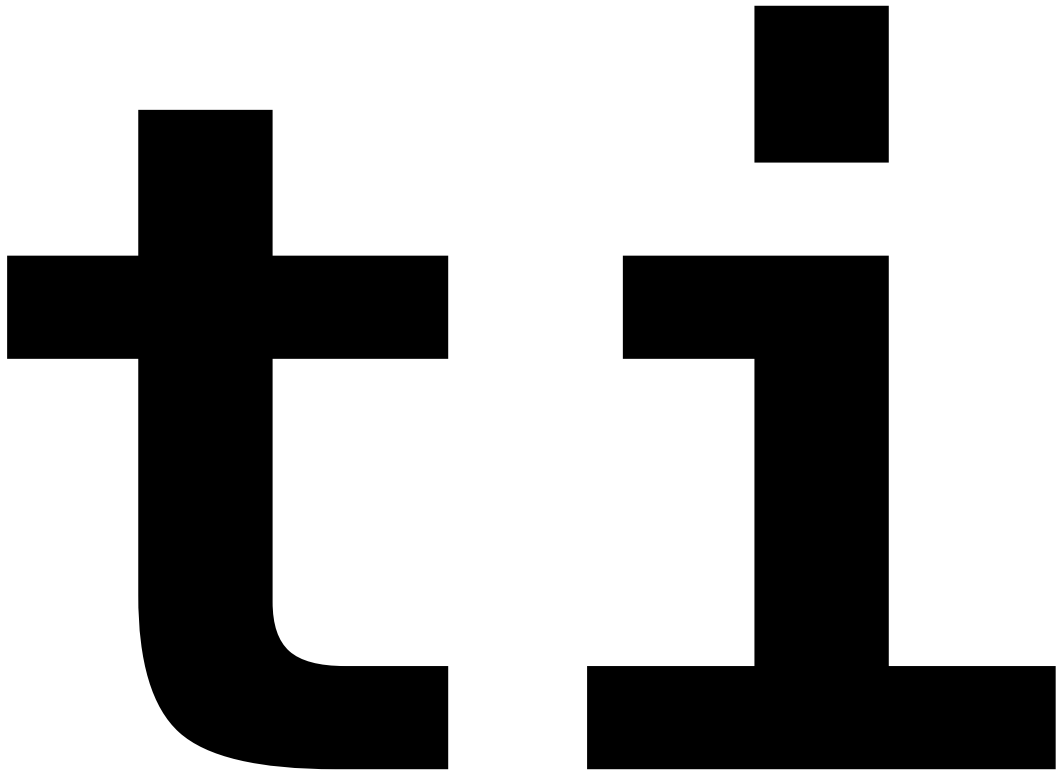
ol

ie


rt

(P

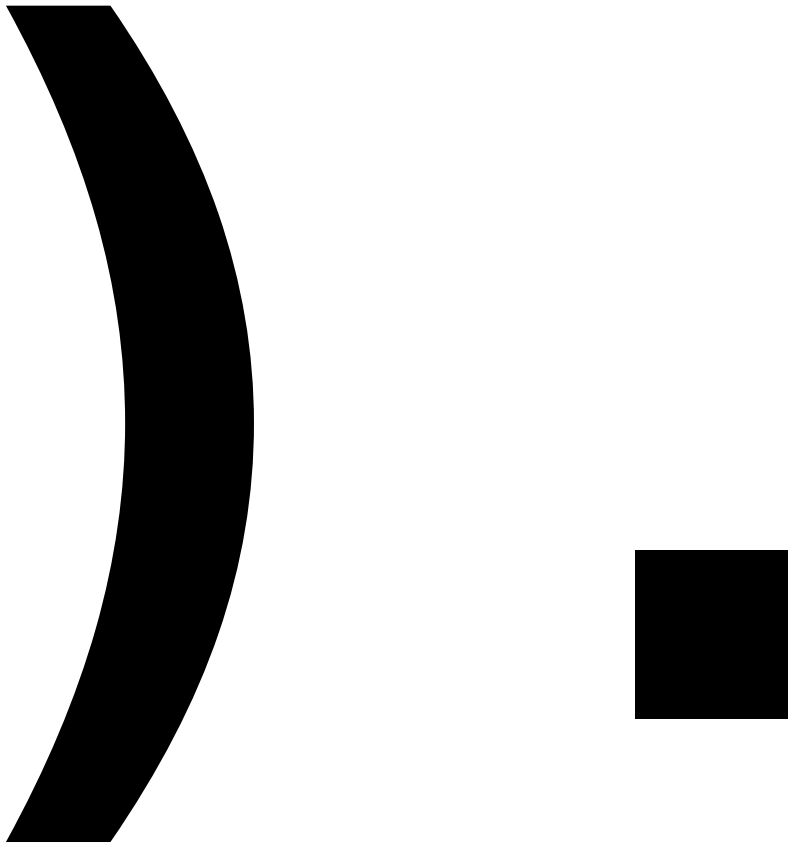
el



er

20

04



Si

e

un

te

rs

ch

ei

de

t

sí

ch



ge

wi



er

we

is

e

VO

n

de

r

VO

n

de

r

US



Na

vy


ab

ge




it

et

en

To

po

gr

ap


hi

e




Sm


it

h

et

al

(2

00

8)

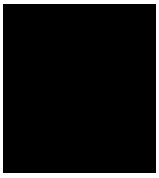
un

d

Ha

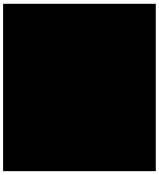

dC

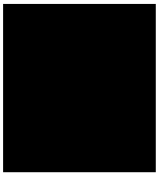
МЗ





nk






ht


tp



/ s


ci

en

ce

of

do

om



om

/2

01

3/

12

/ 3

1/

gh

os

ts



of



cl



at

es



pa

st



pa


rt

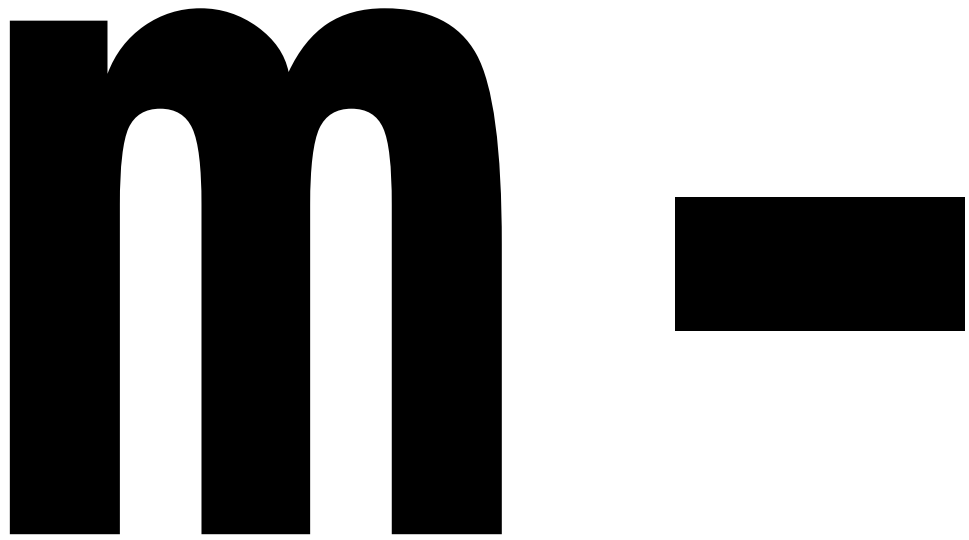


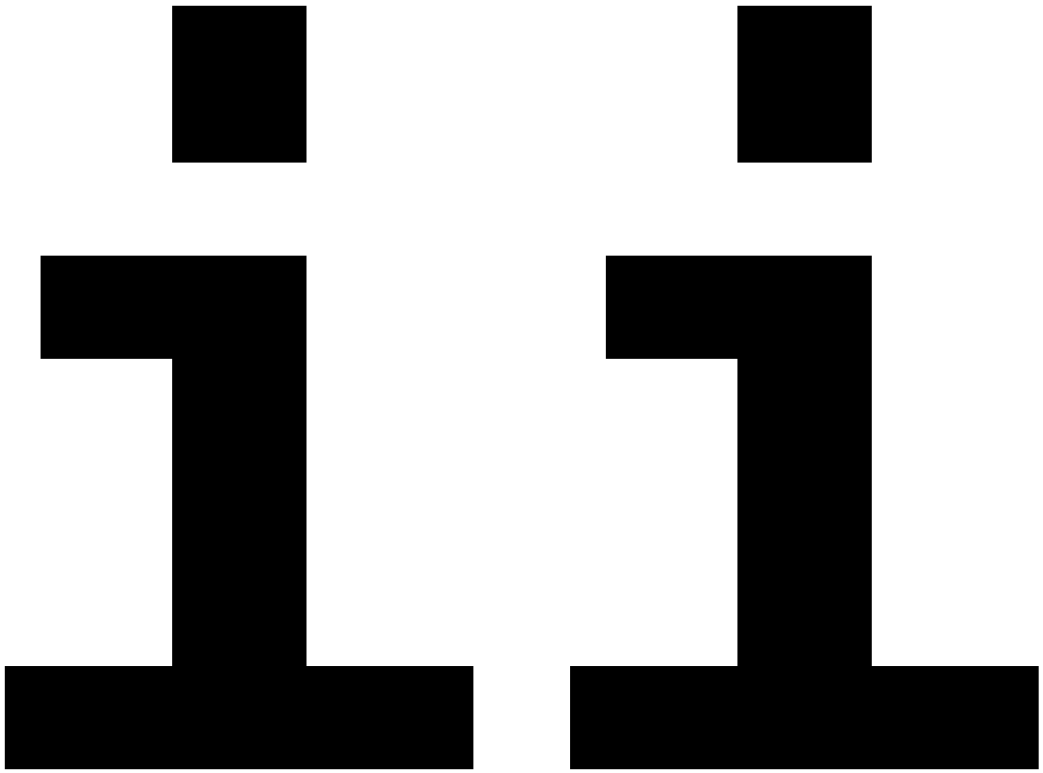


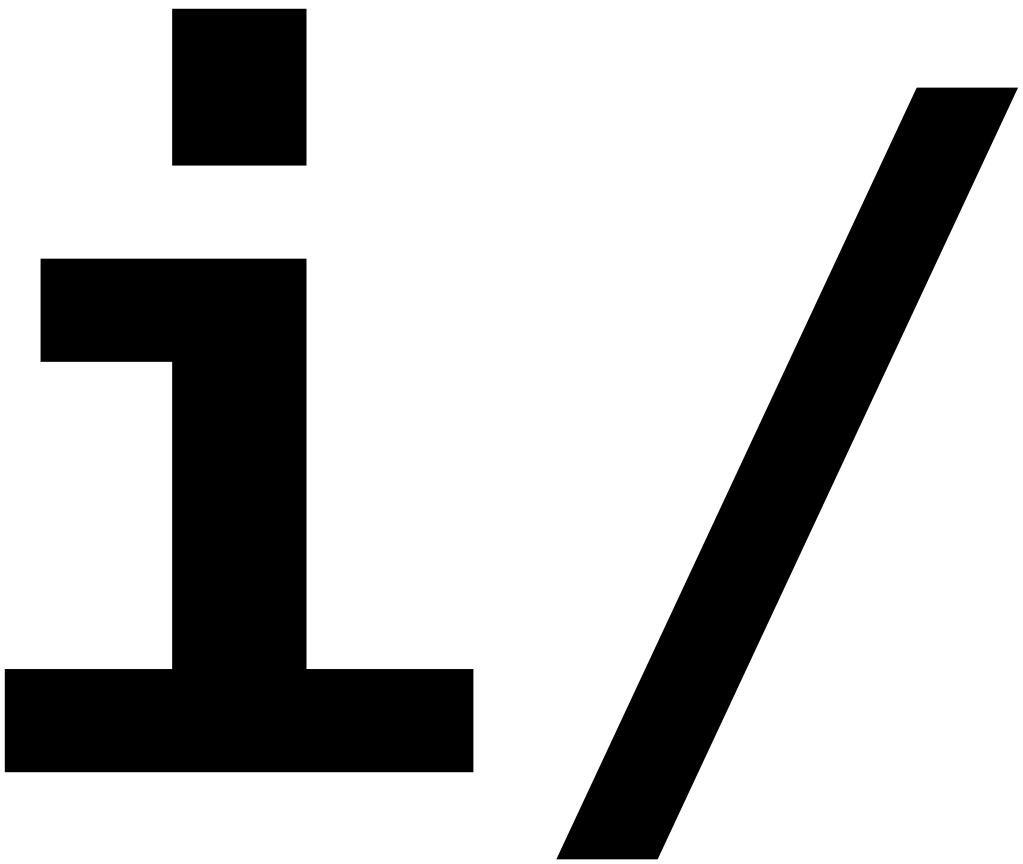
ne



gc







Di

e

bi

sh

er


ig

en

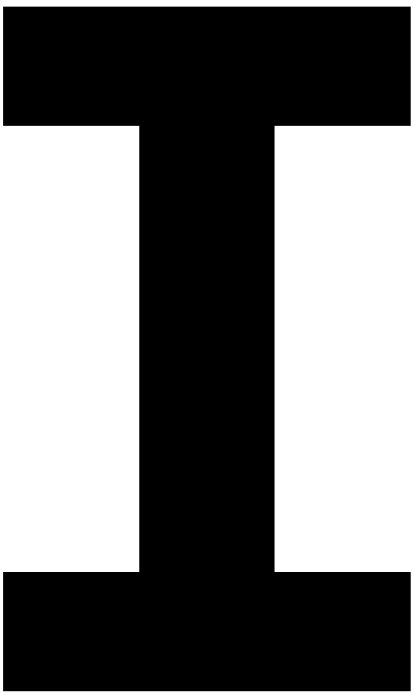
Te



e:

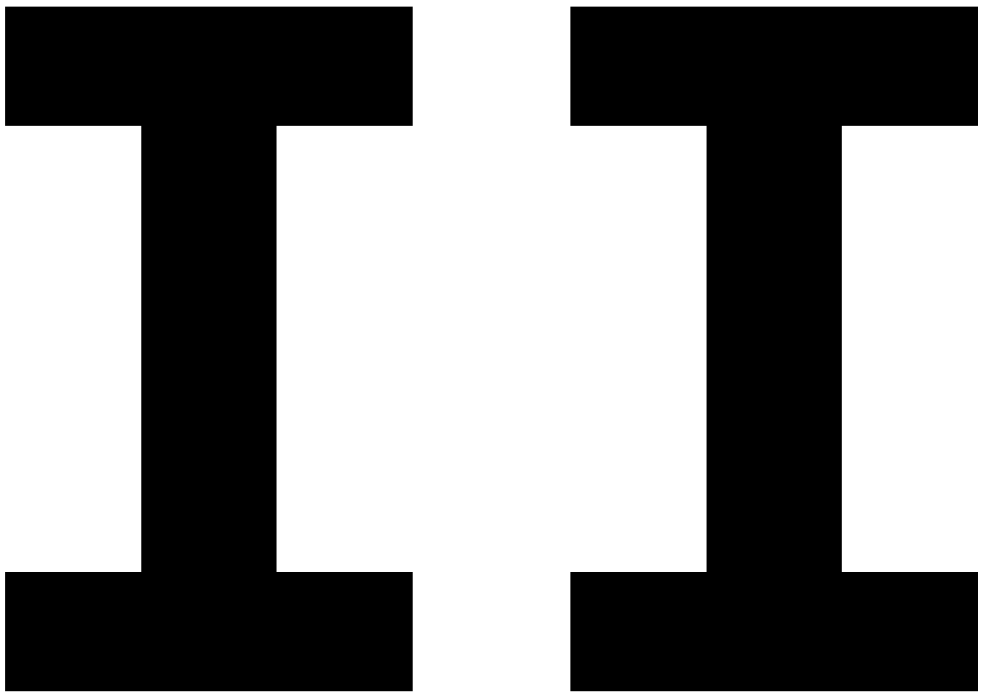
Te

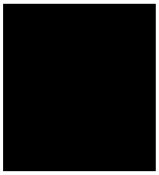


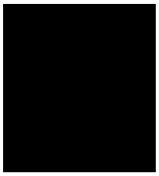


un

d







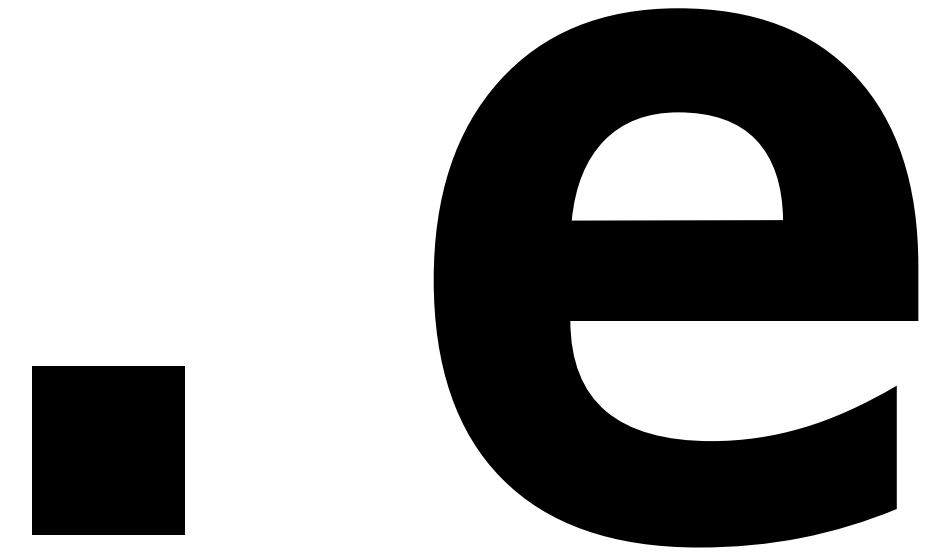

ht


tp



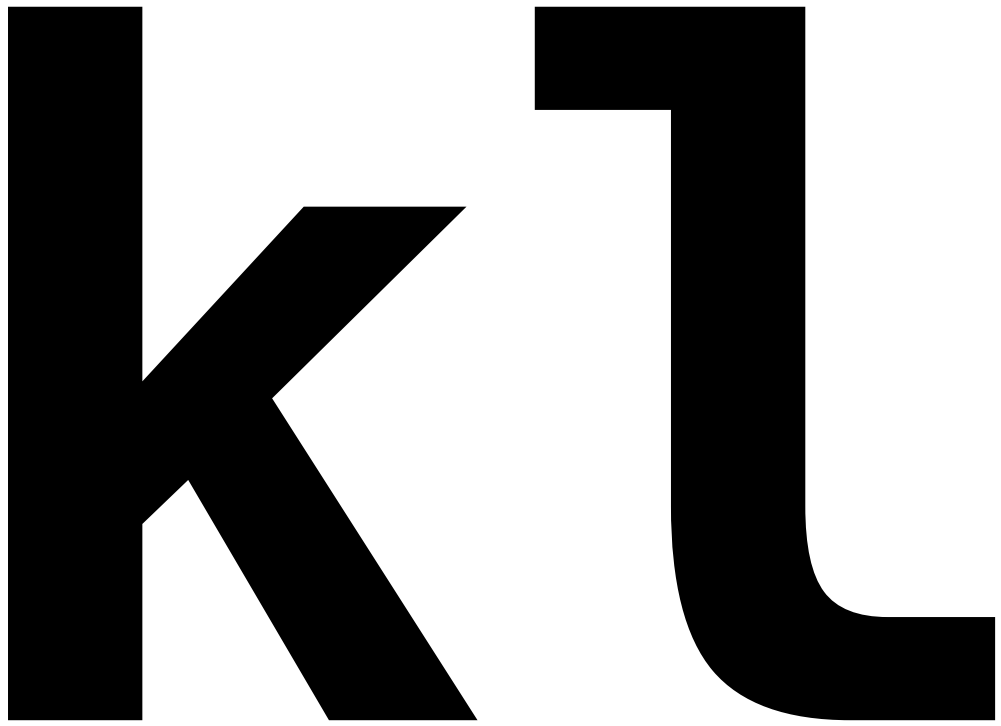








e-





a –

en

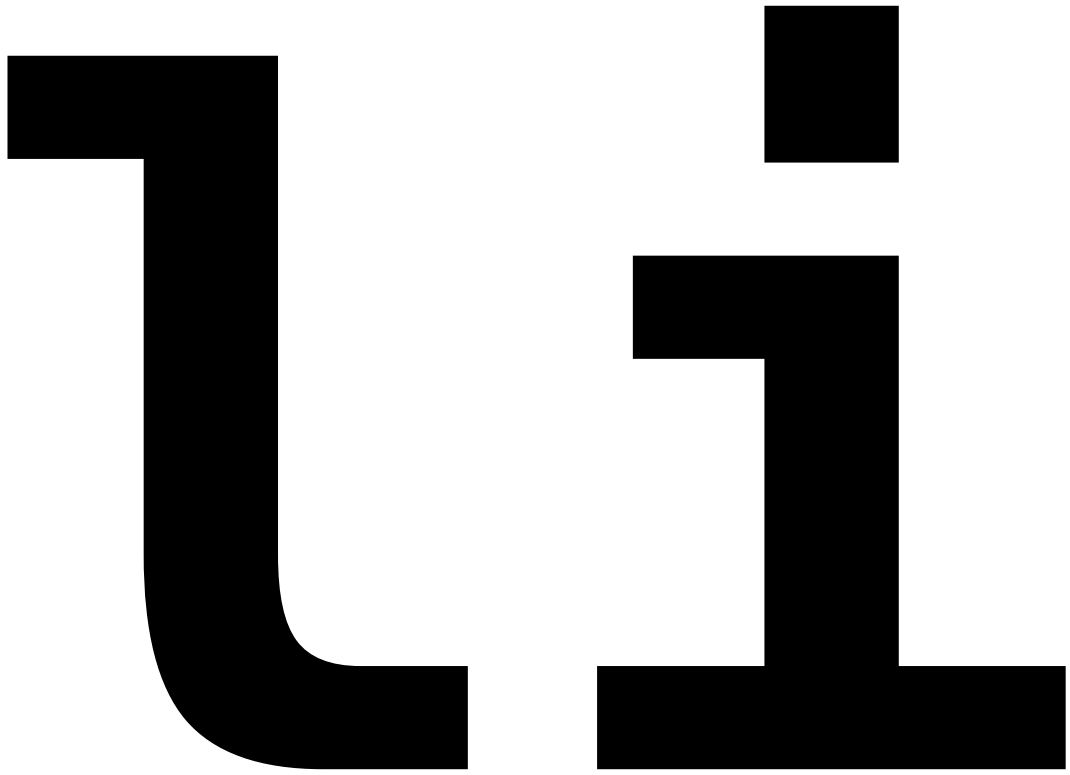
er

gi

e.

eu

/c



ma

te

ga

te



an

ze


ig

e/

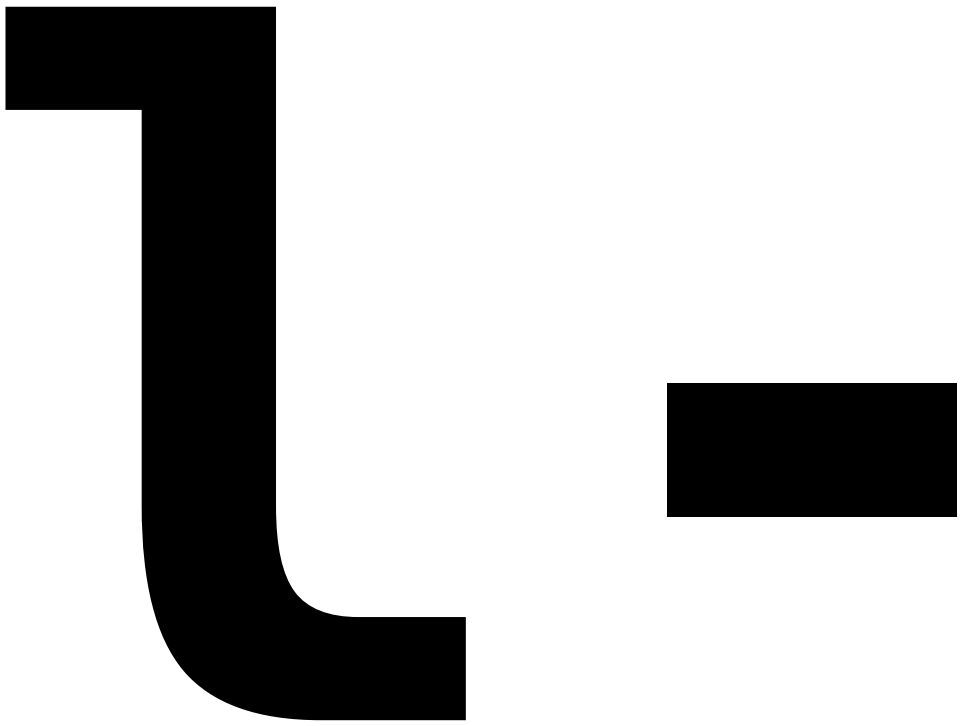
da



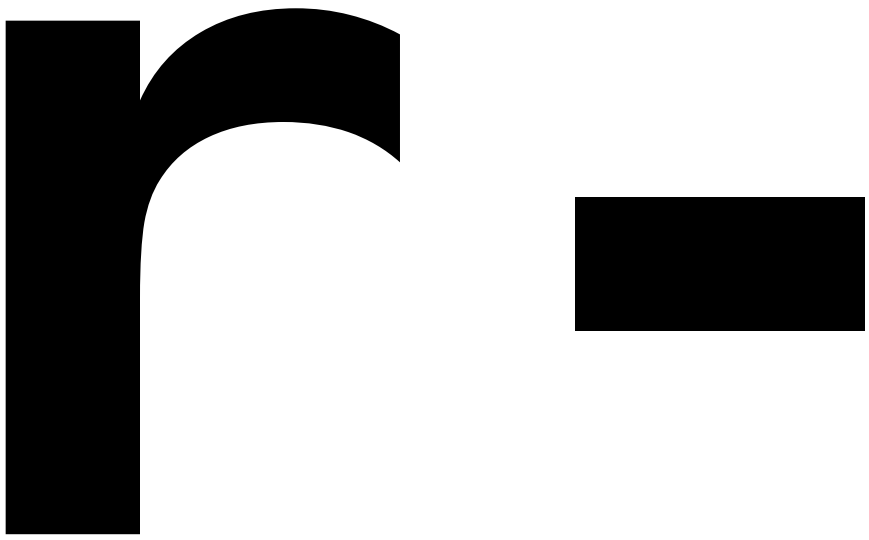
ra

et

se



de

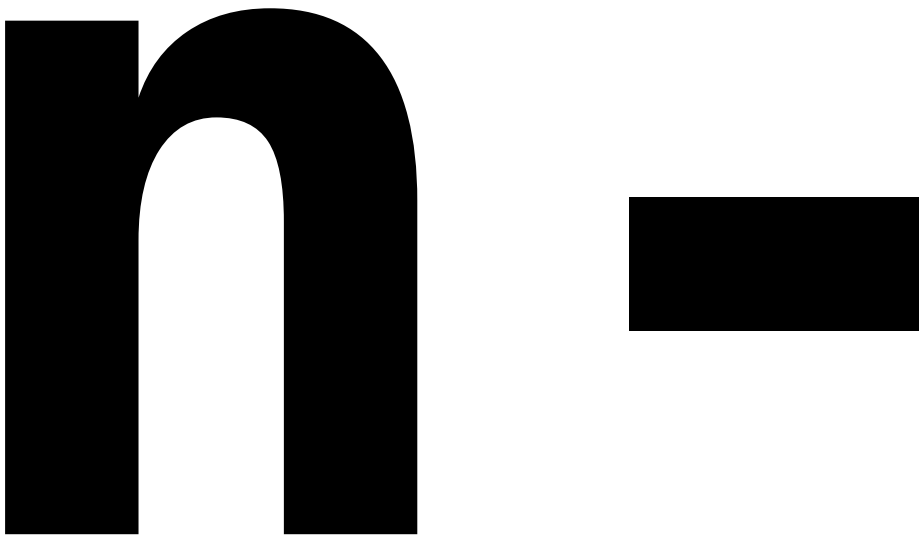


ei


SZ

ei

te



te

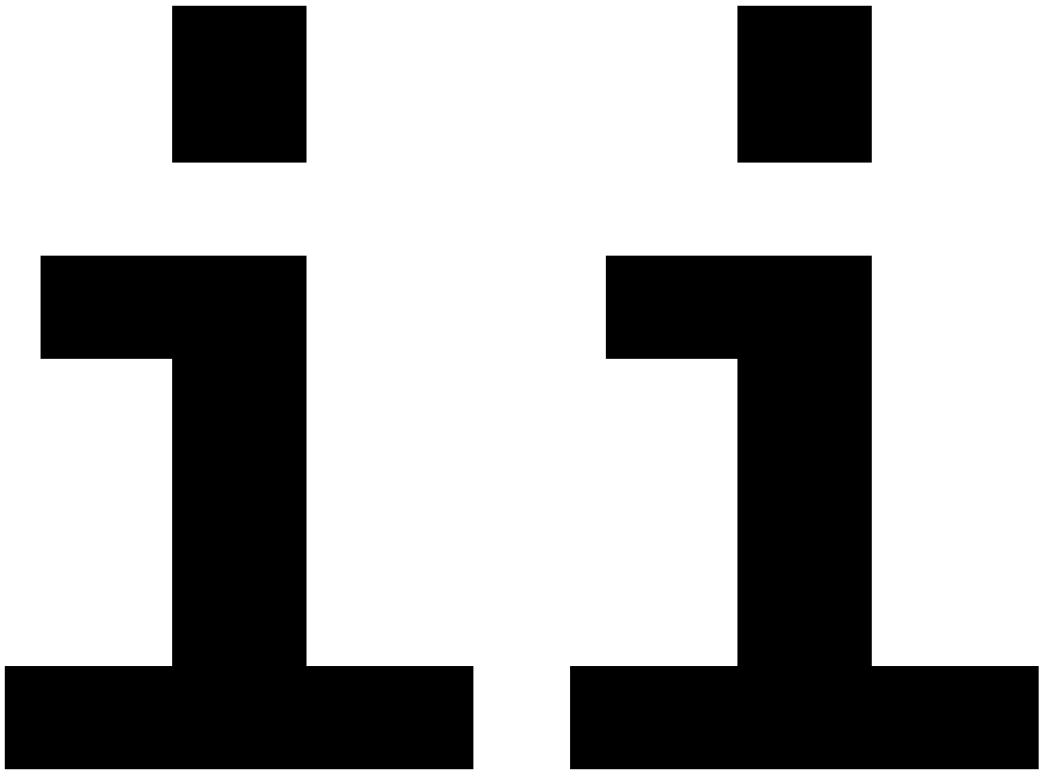


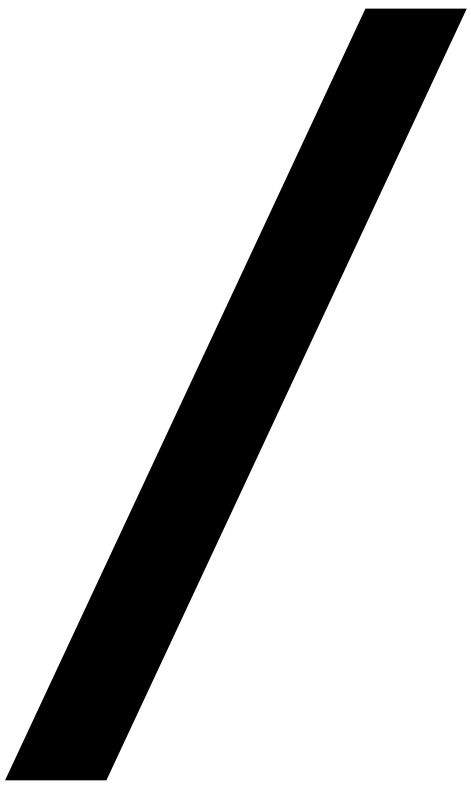




un

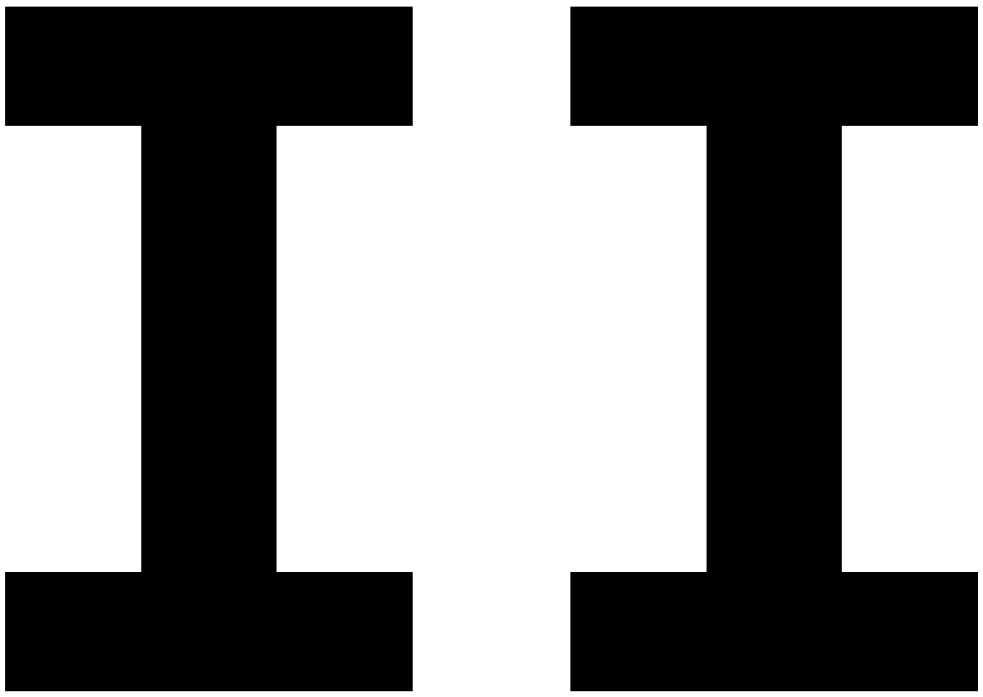
d –





Te







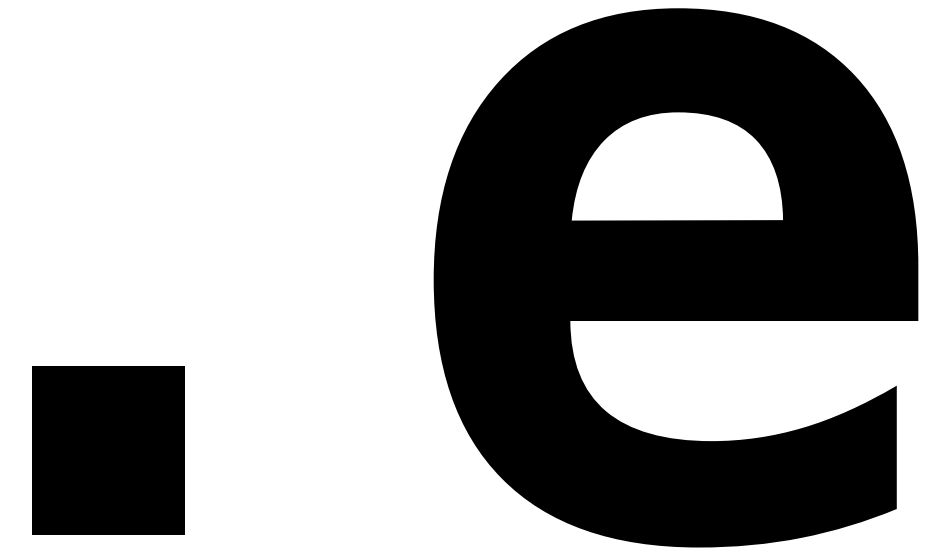

ht


tp



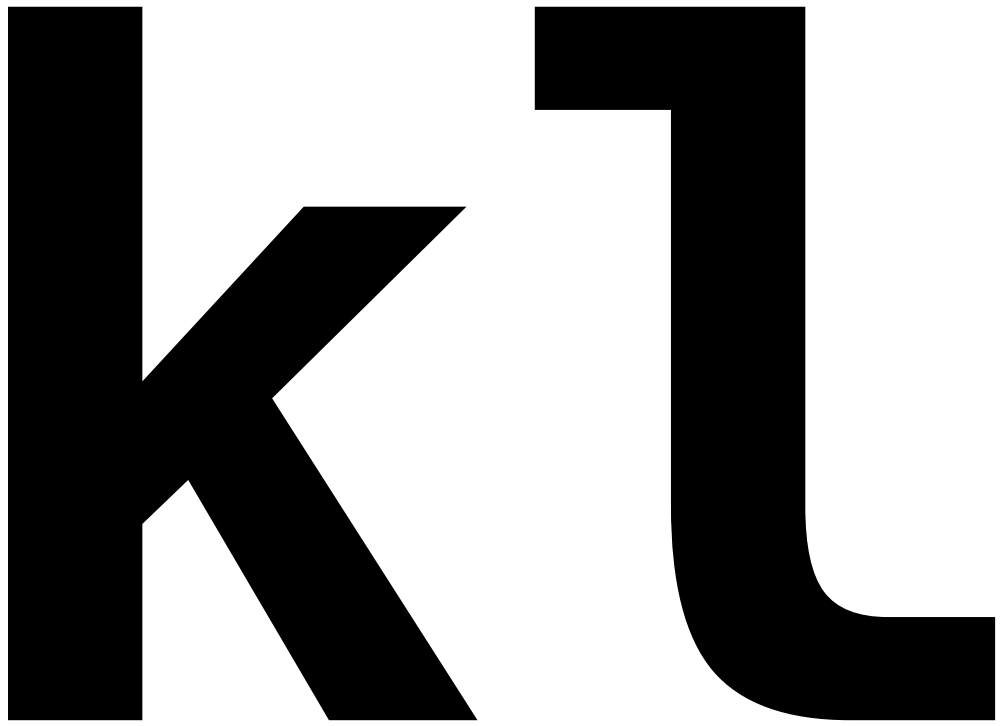








e-





a –

en

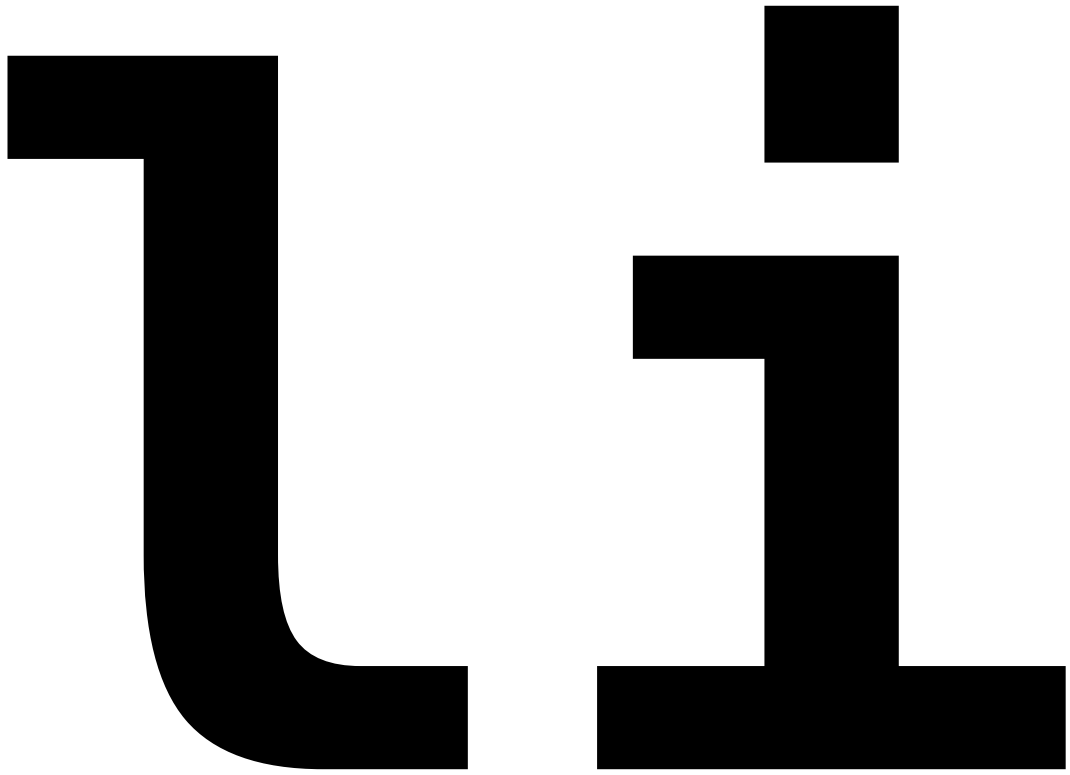
er

gi

e.

eu

/c



ma

te

ga

te



an

ze


ig

e/

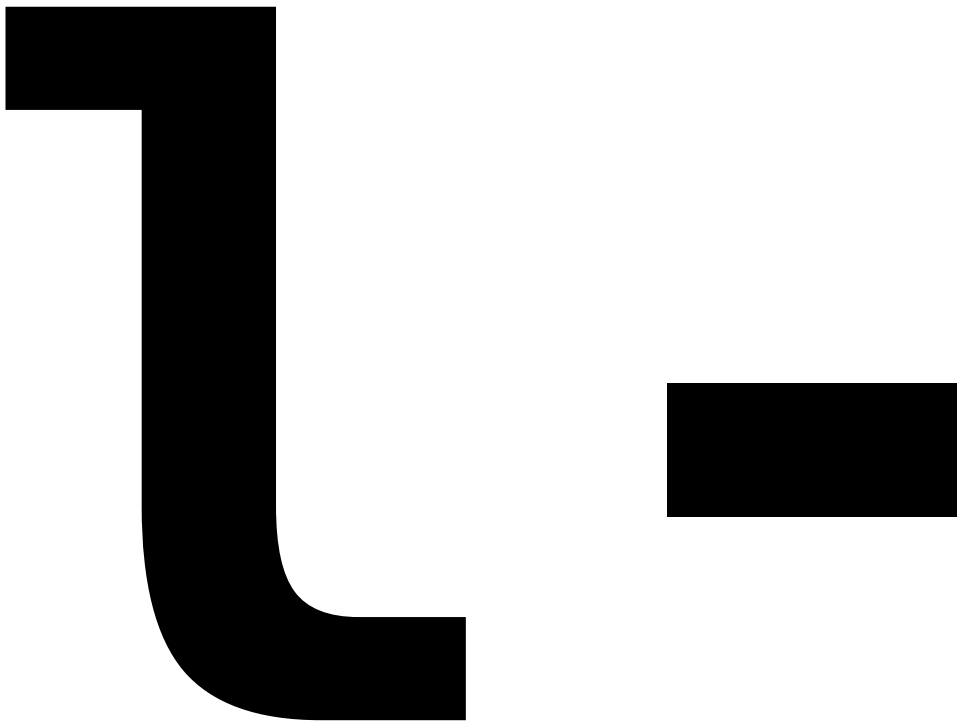
da



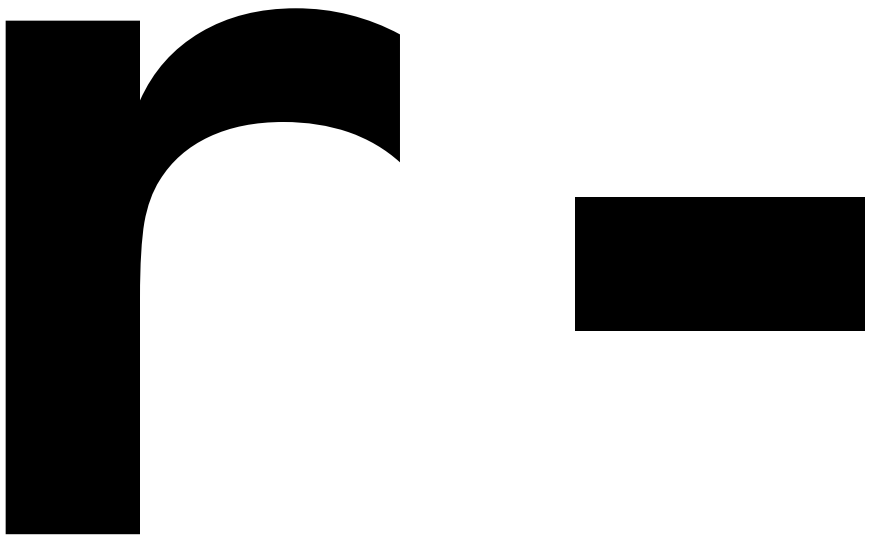
ra

et

se



de

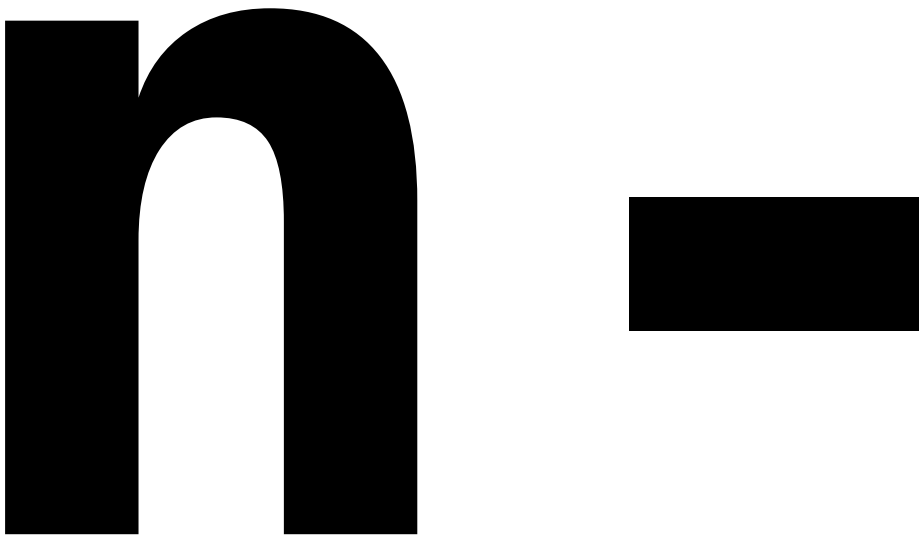


ei


SZ

ei

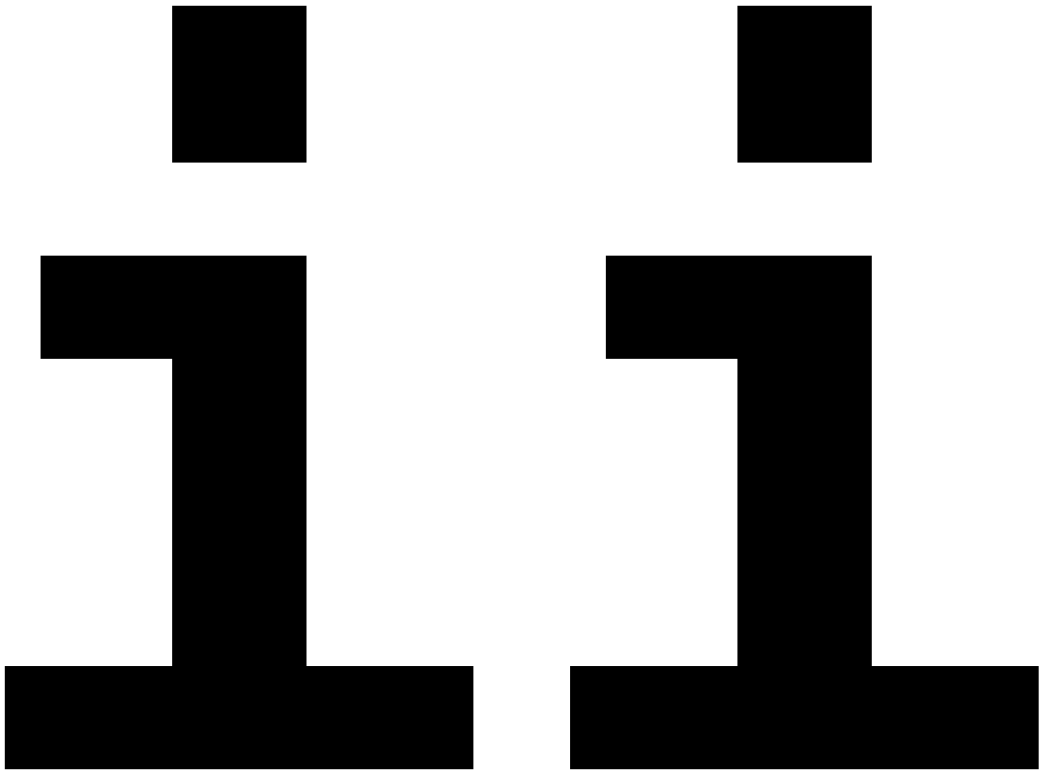
te



te









ha

ys





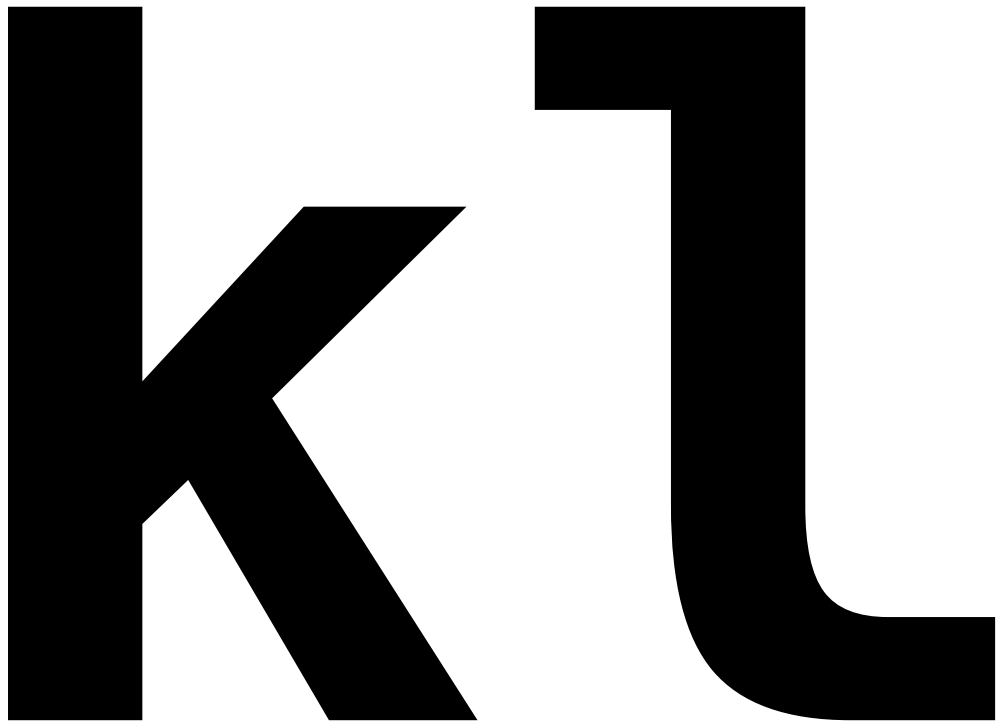
br

ie



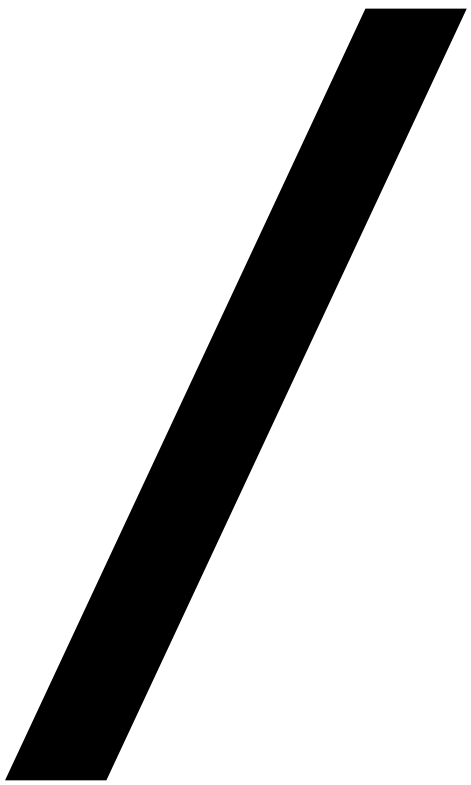
sh

ac



et

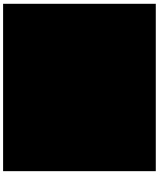
on

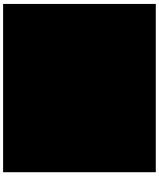


Te



IV





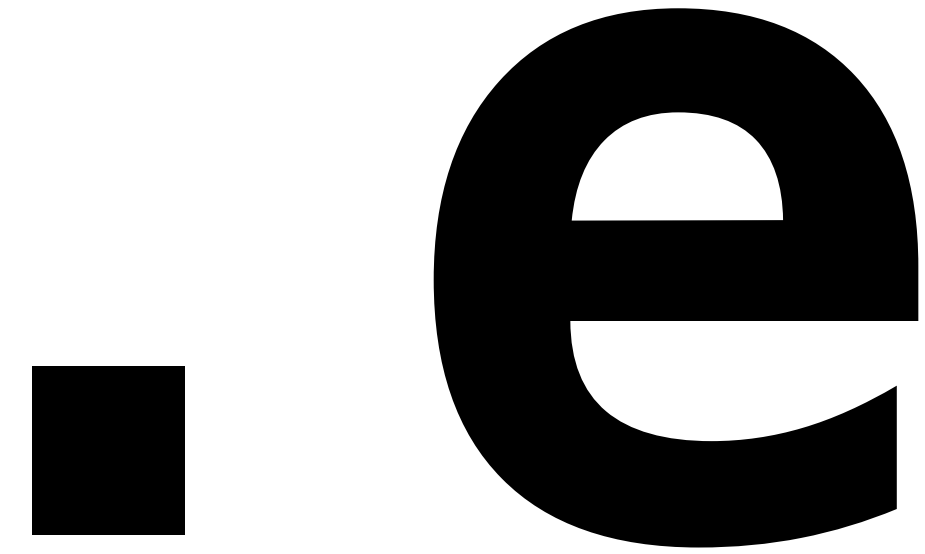

ht


tp



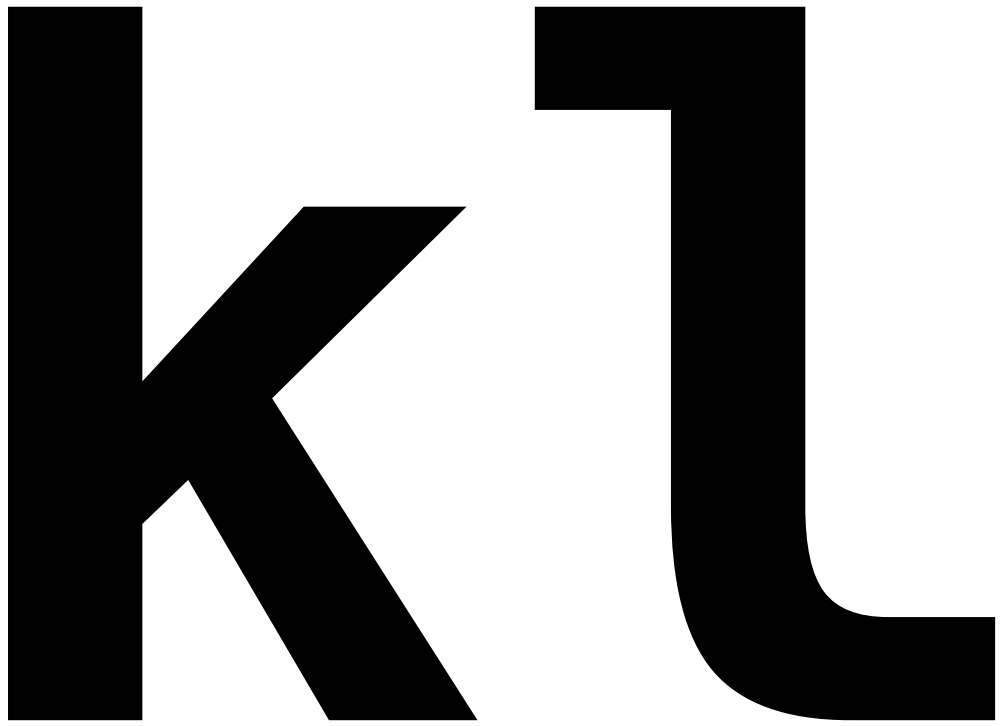








e-





a –

en

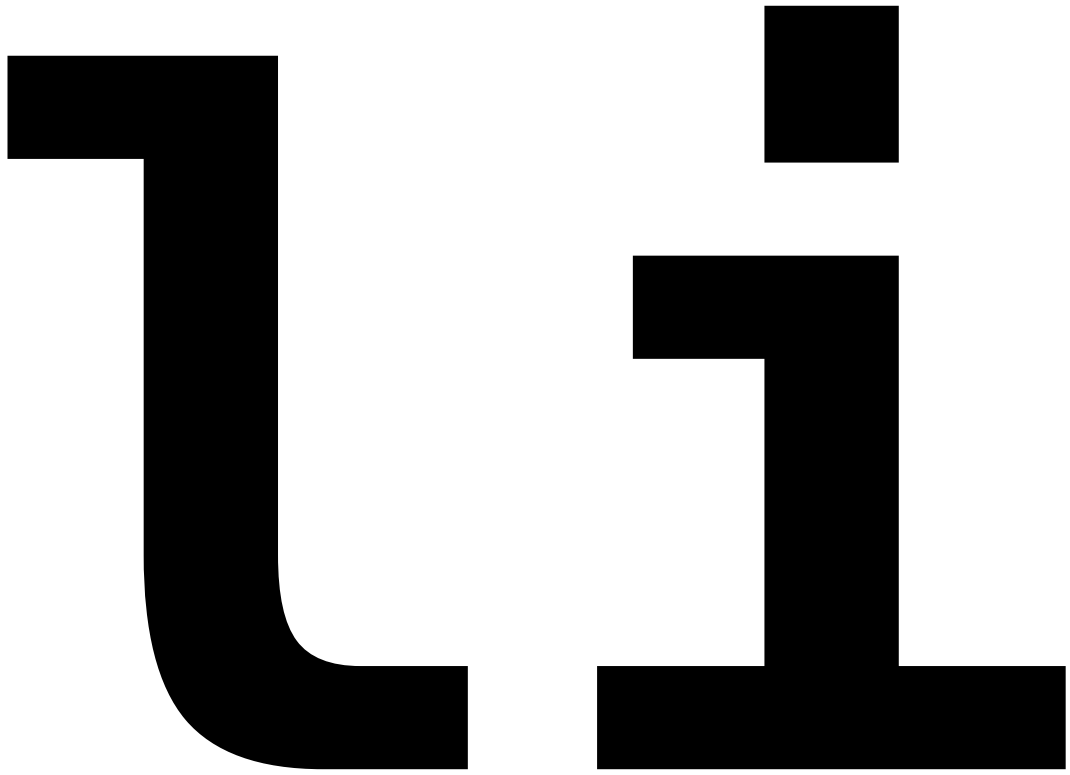
er

gi

e.

eu

/c



ma

te

ga

te



an

ze


ig

e/

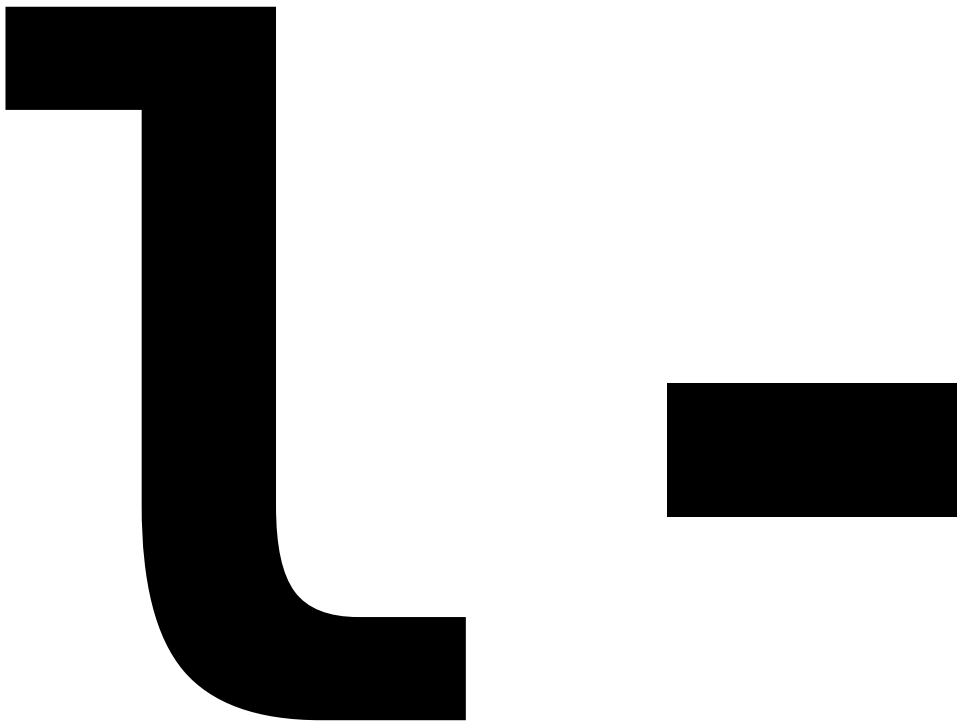
da



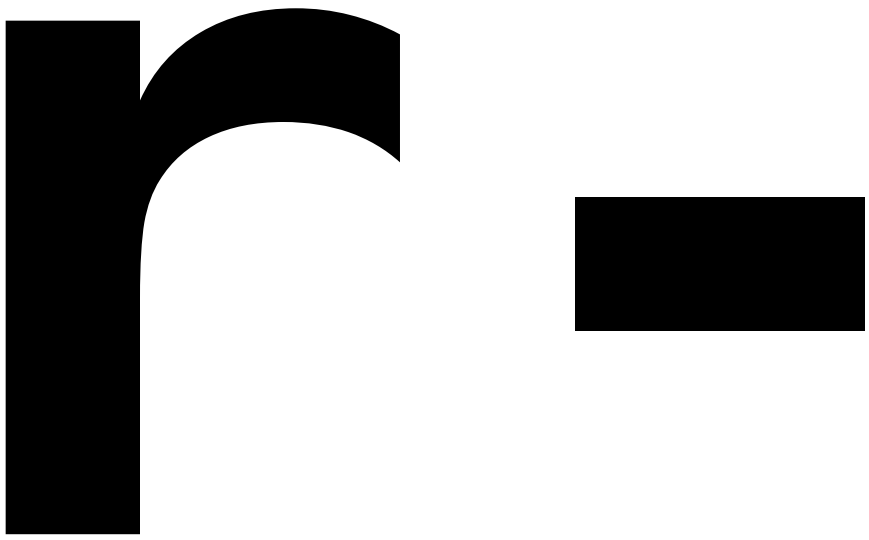
ra

et

se



de

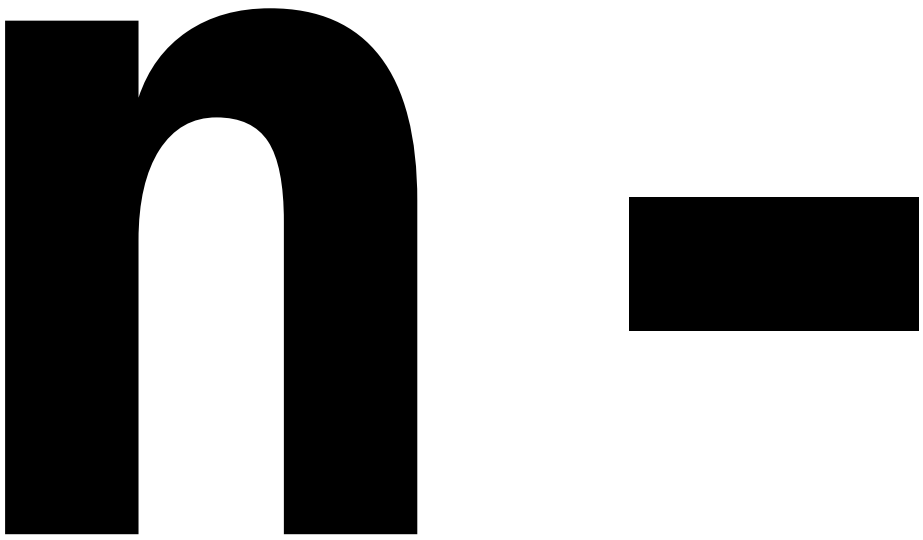


ei


SZ

ei

te



te





iv



um


la



ba



en



ja

hr

es

ze


it

en

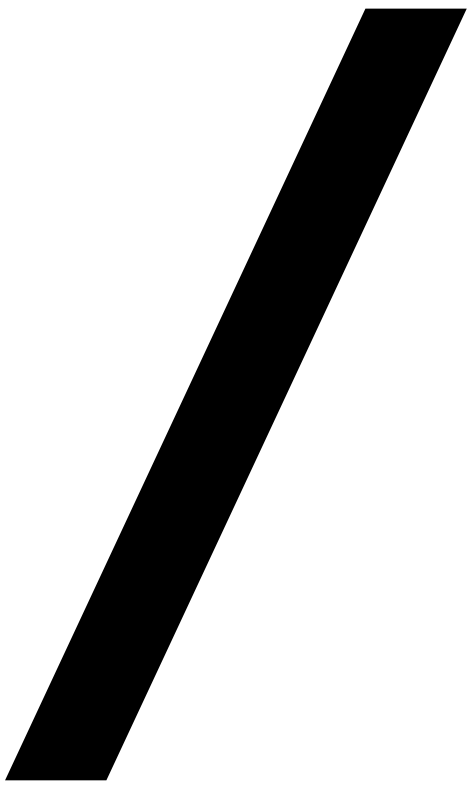


un

d –

me

hr



Te





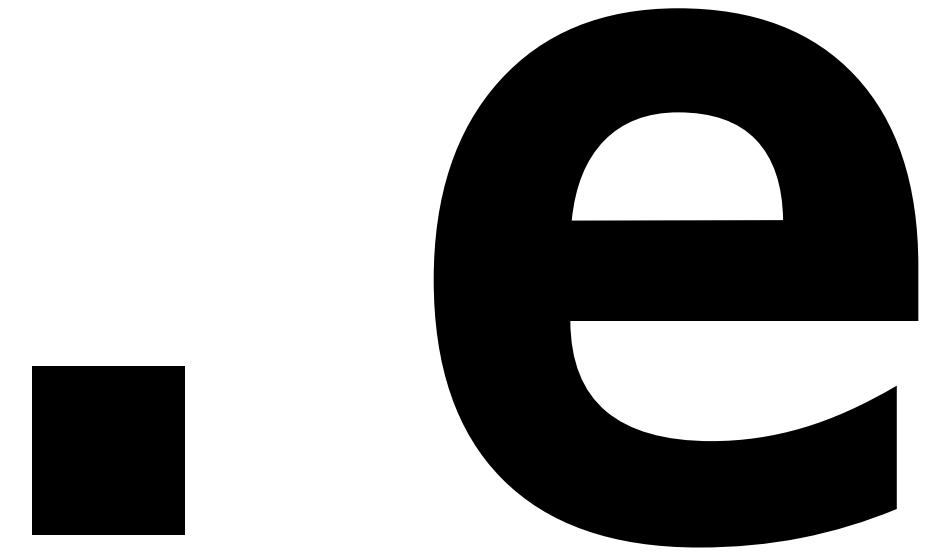

ht


tp



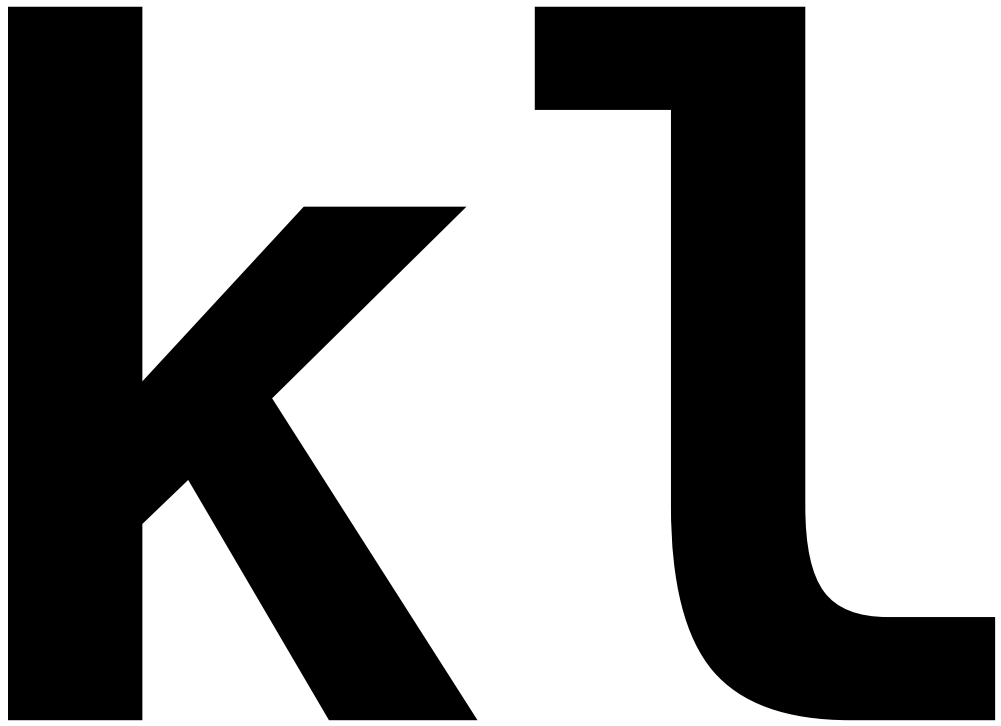








e-





a –

en

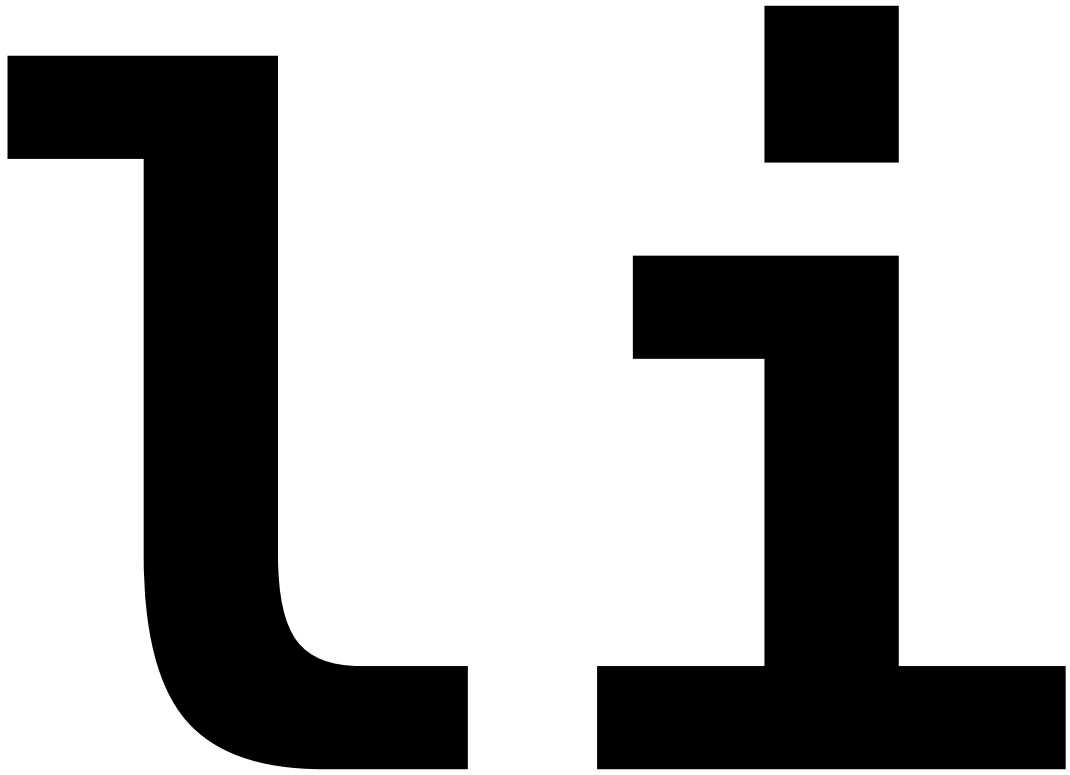
er

gi

e.

eu

/k



ma



an

ze


ig

e/

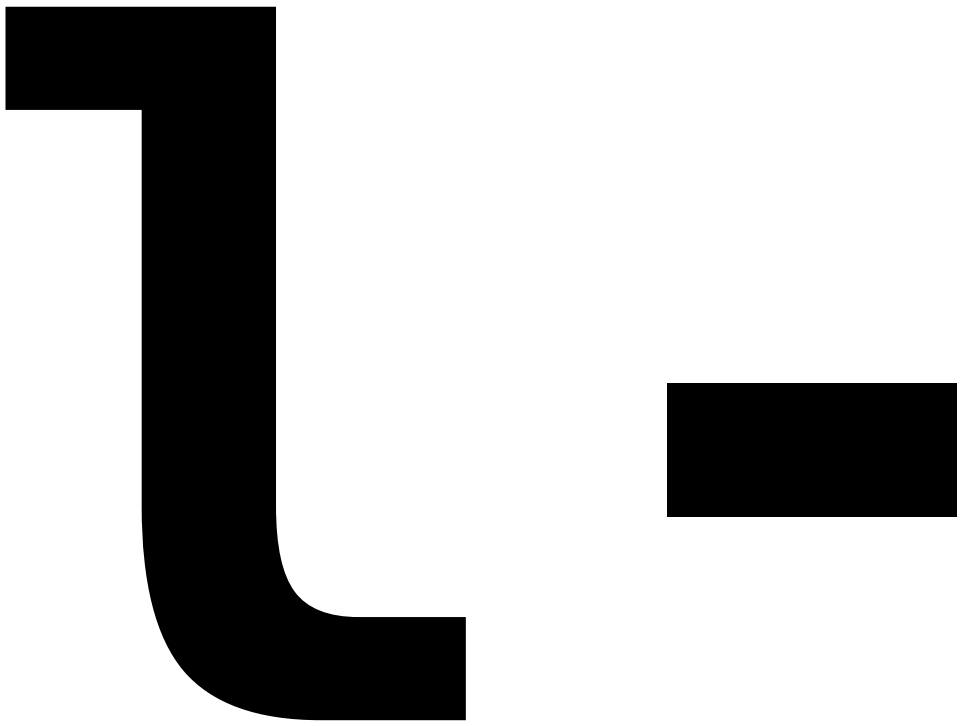
da



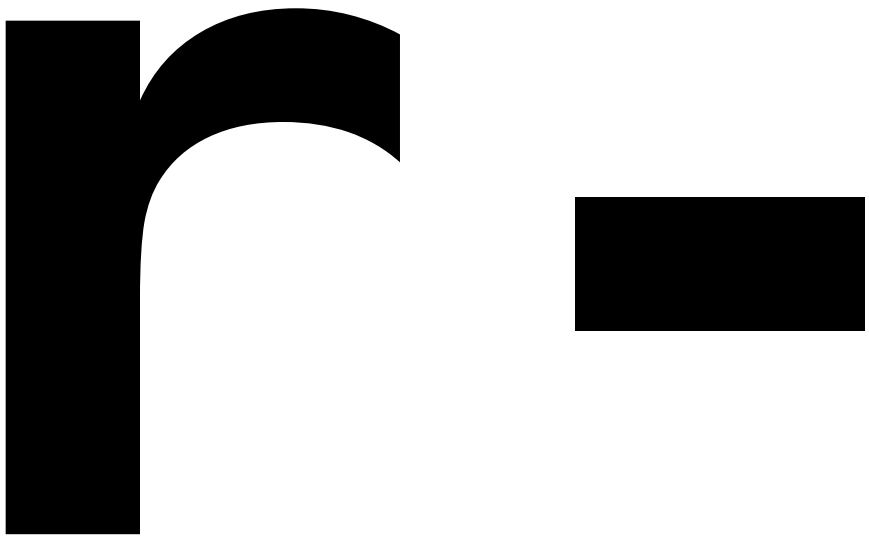
ra

et

se



de

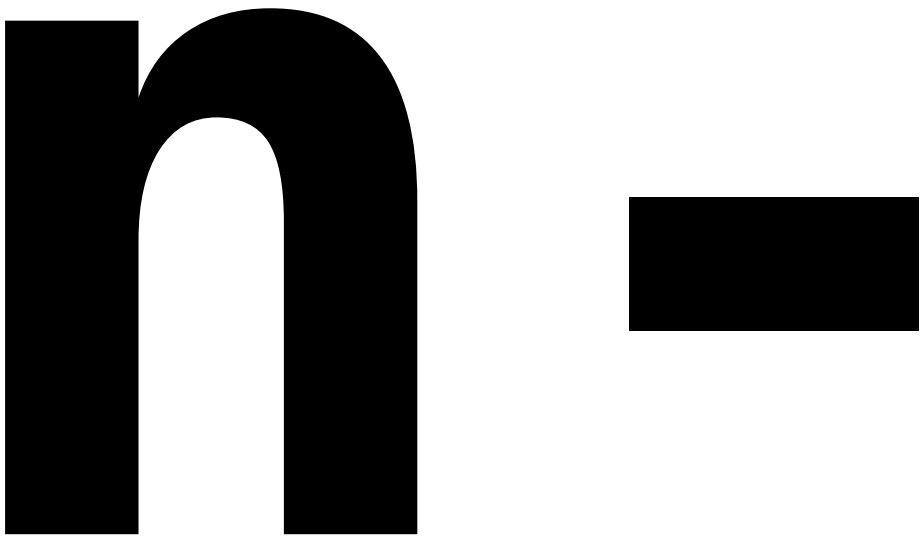


ei


SZ

ei

te



te







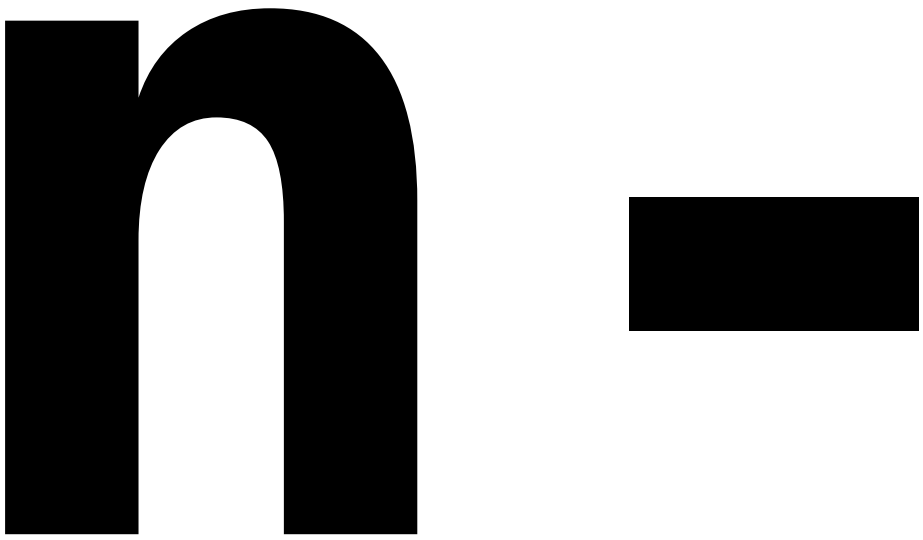
ae

nd

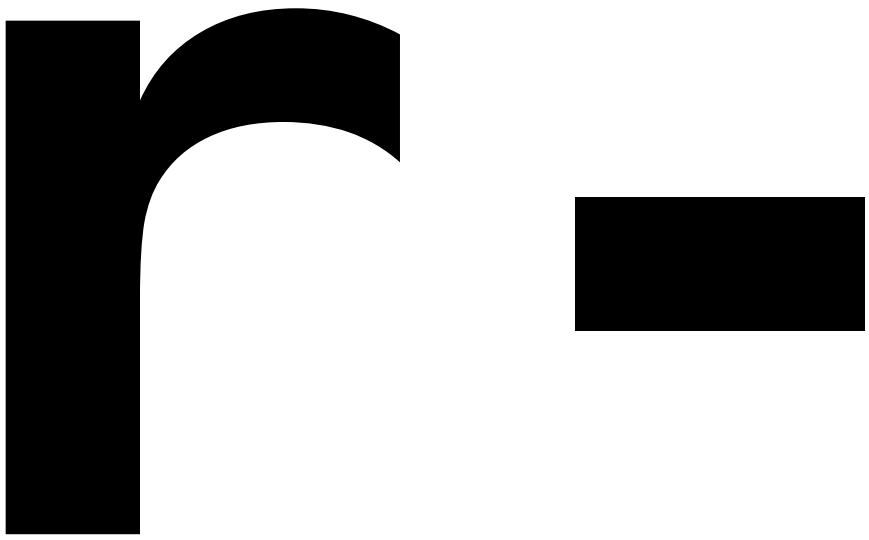
er

un

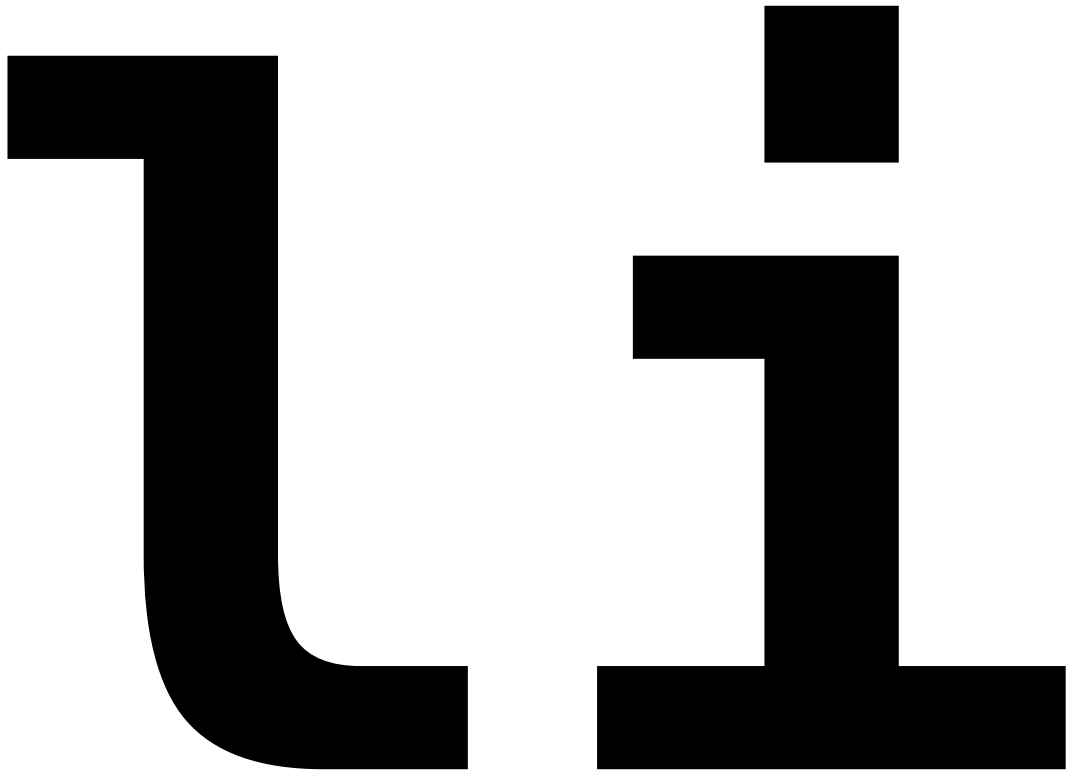
ge



de



ek



pt

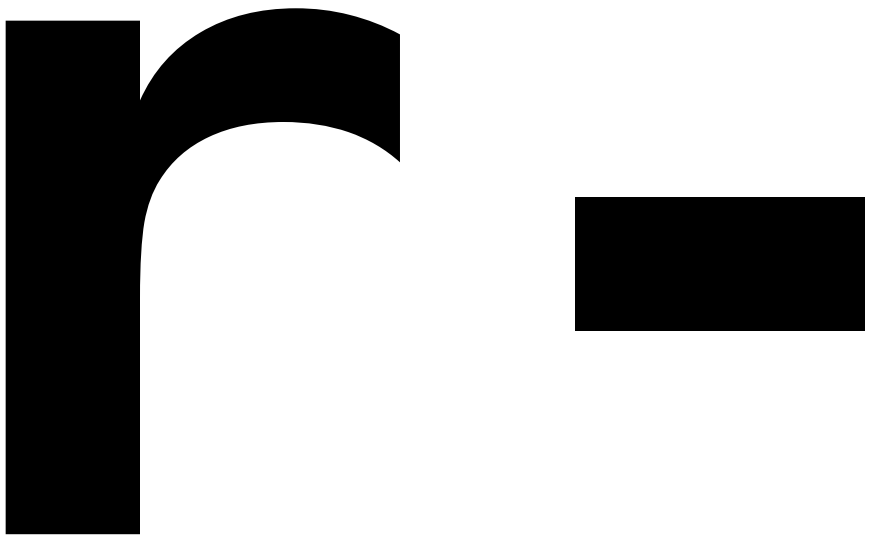




un

d –

de



pr

ae

ze



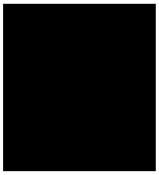
io

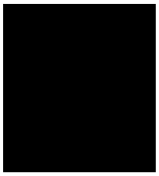


Te



VI





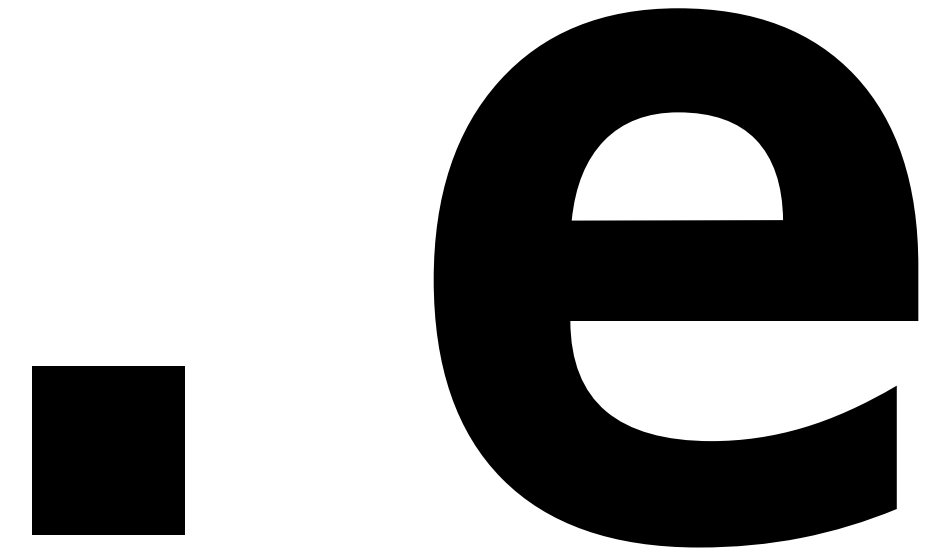

ht


tp



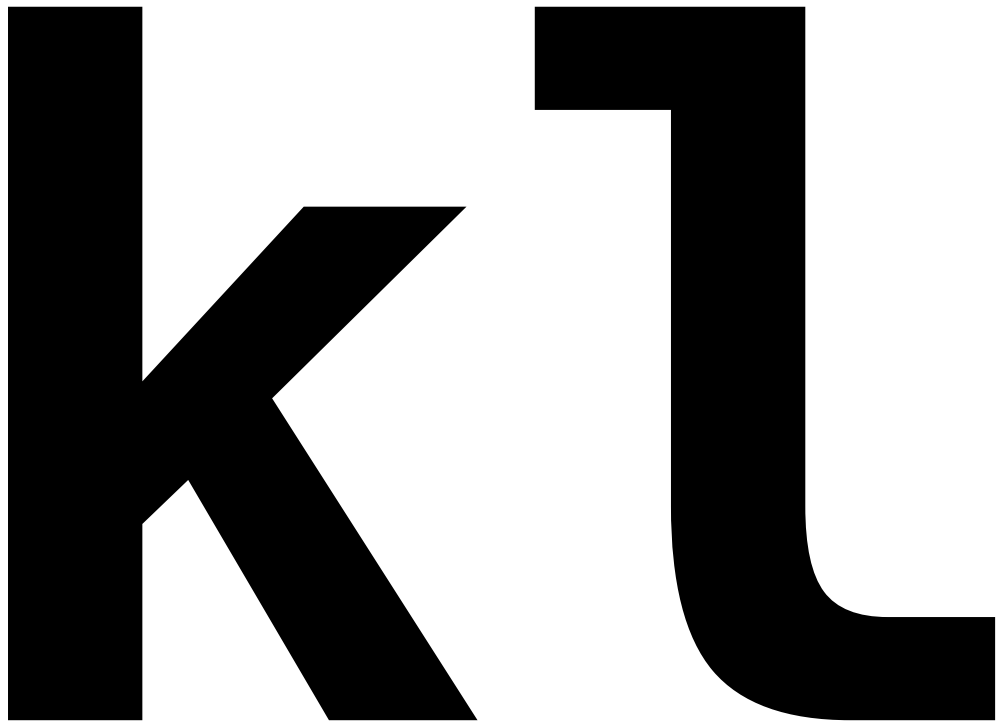








e-





a –

en

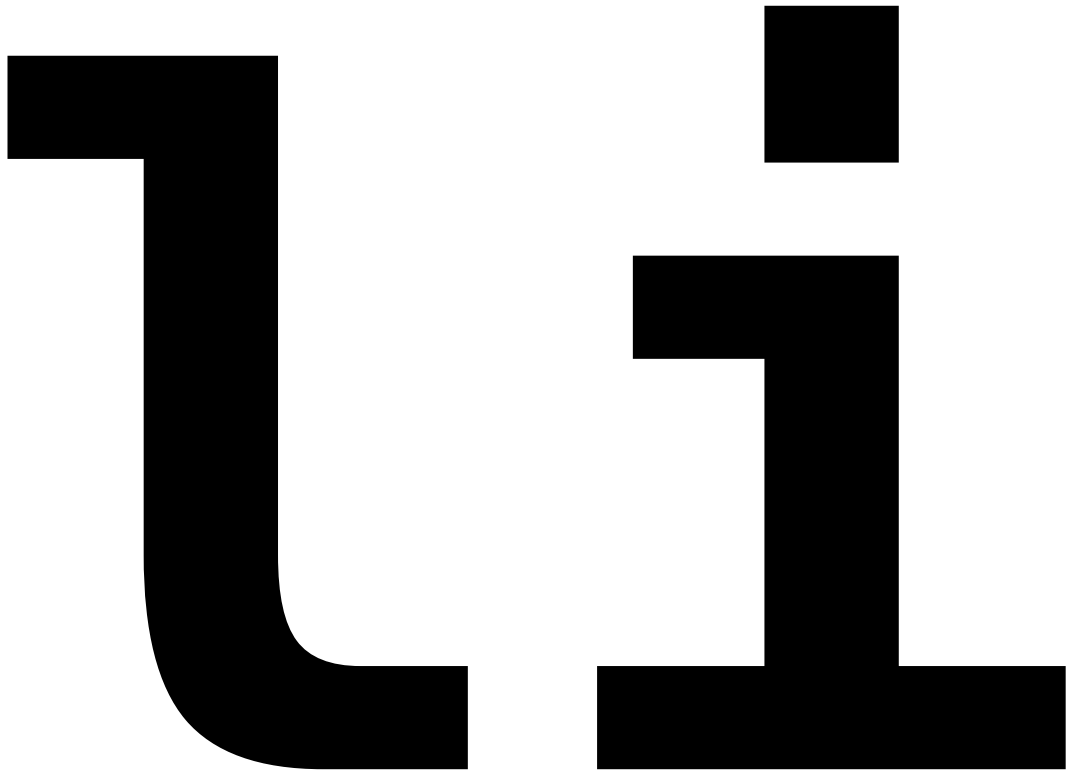
er

gi

e.

eu

/k



ma



an

ze


ig

e/

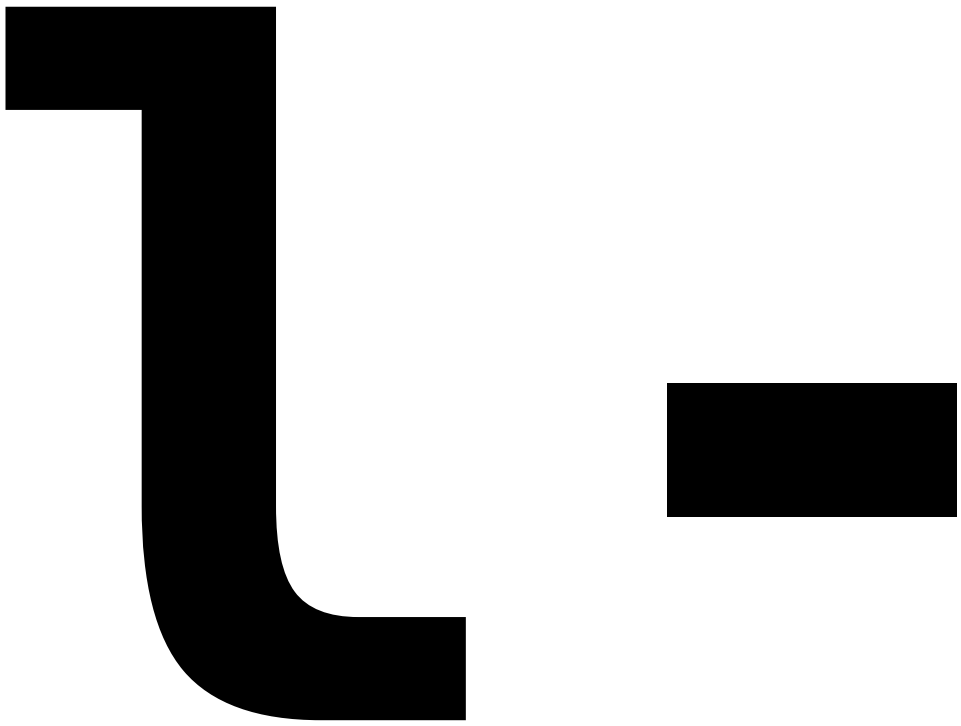
da



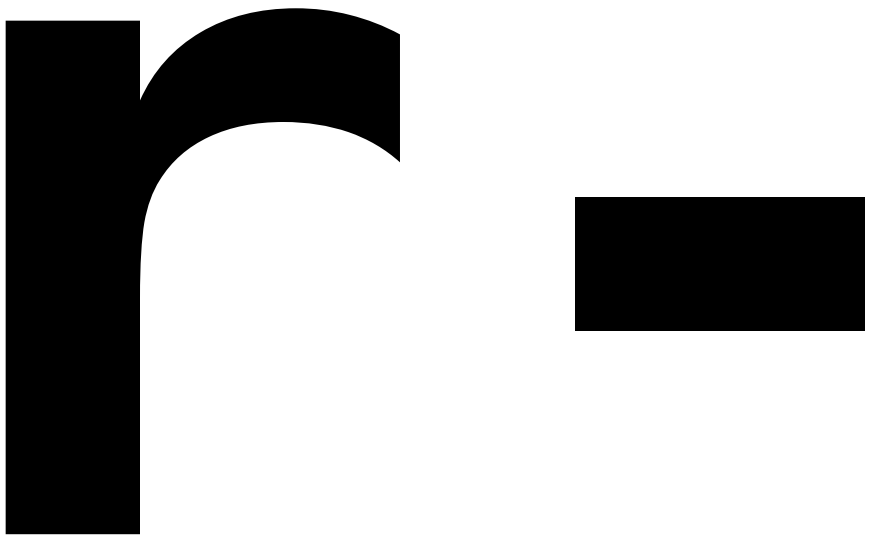
ra

et

se



de

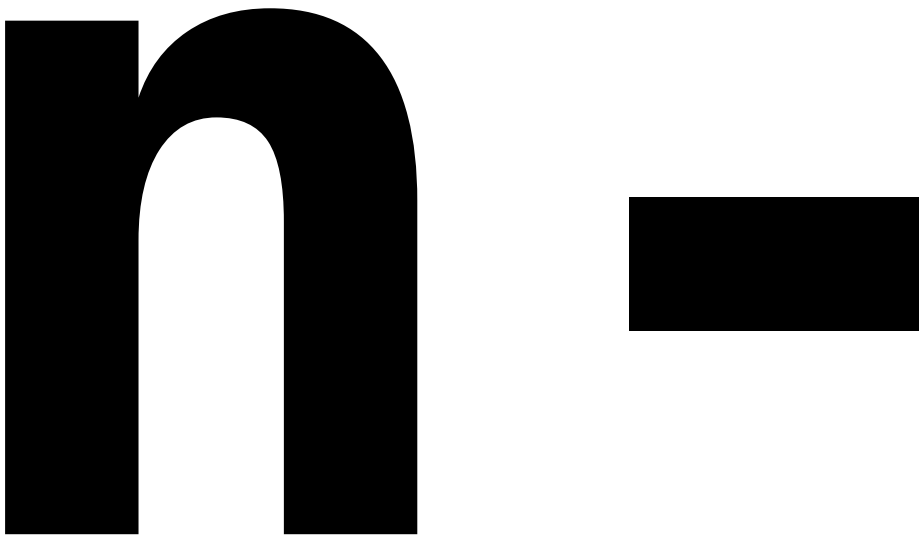


ei


SZ

ei

te



te





vi



hy

po

th

es

en







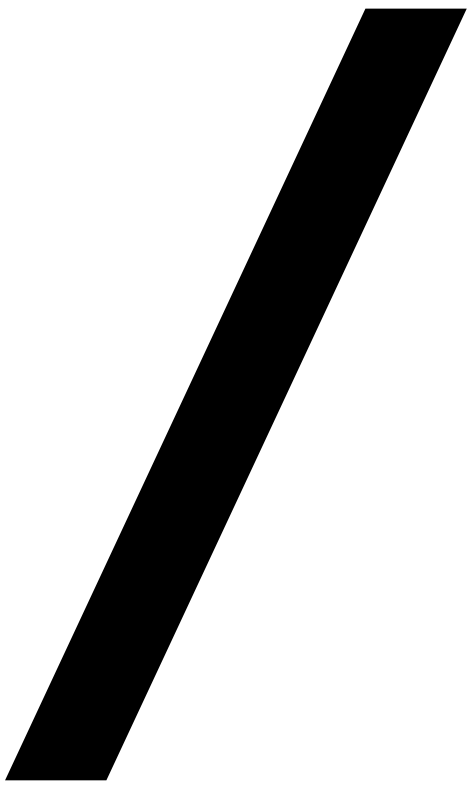
ue

be



lu





Te



VI



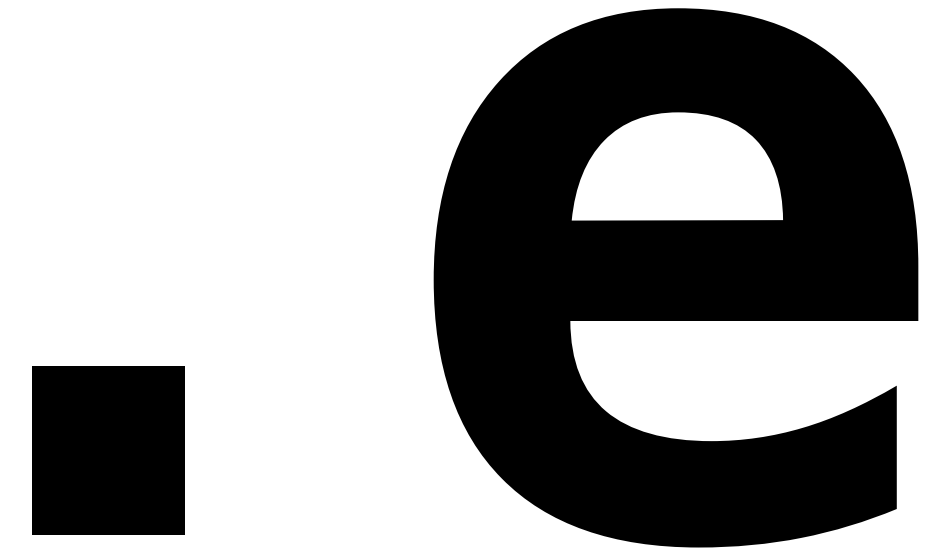

ht


tp



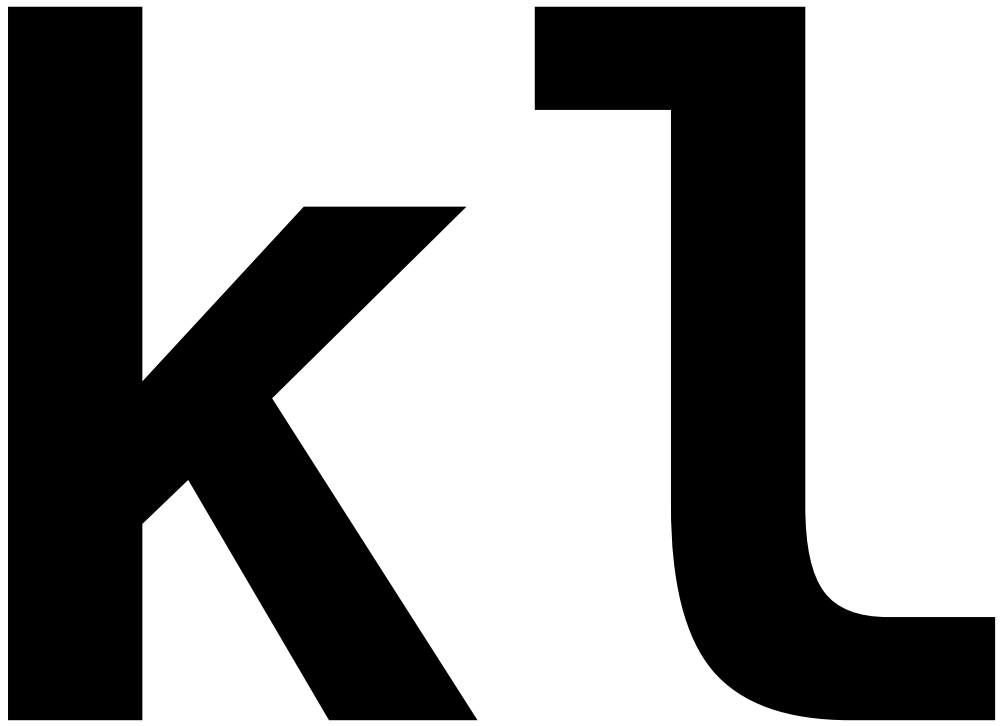








e-





a –

en

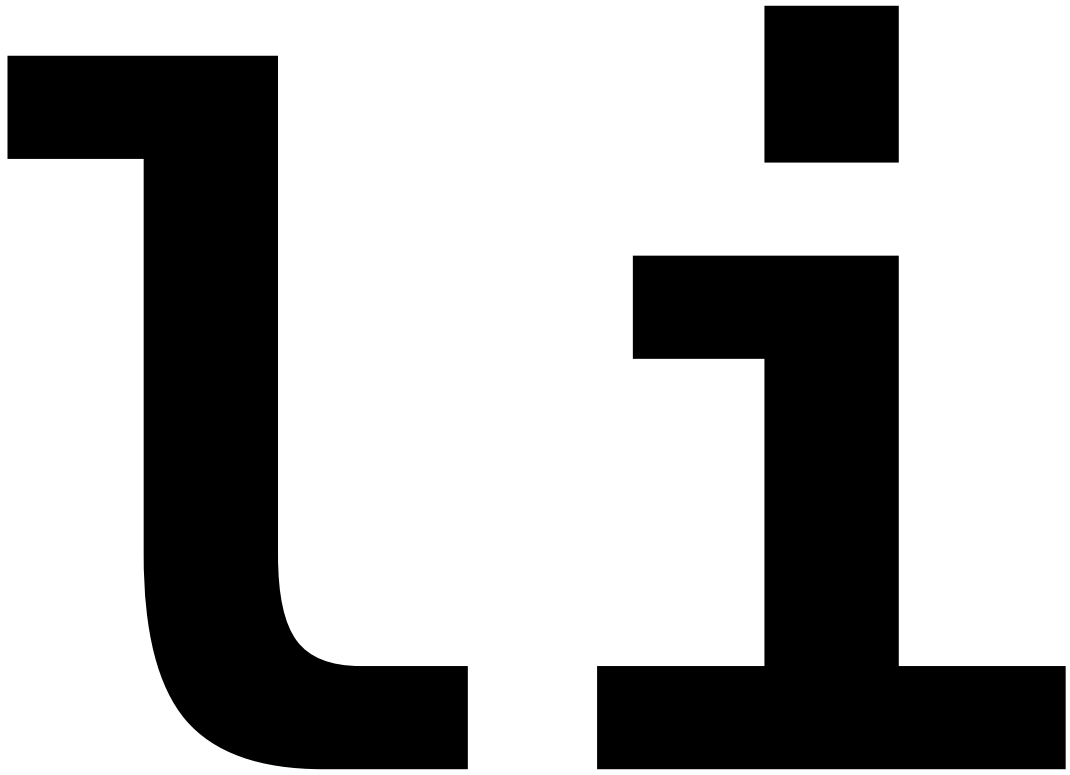
er

gi

e.

eu

/k



ma



an

ze


ig

e/

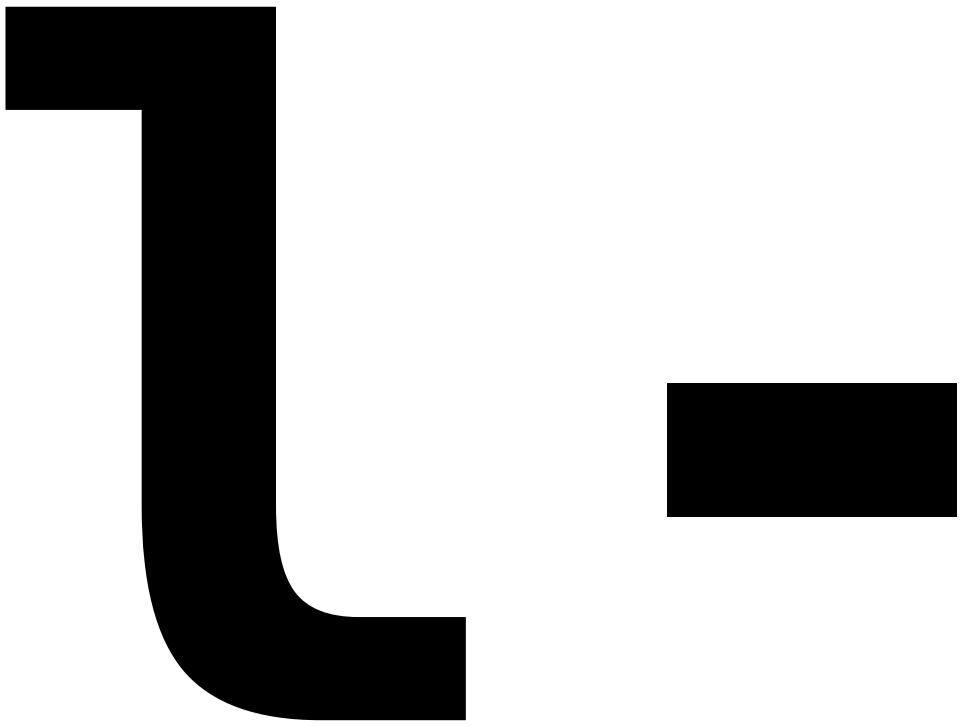
da



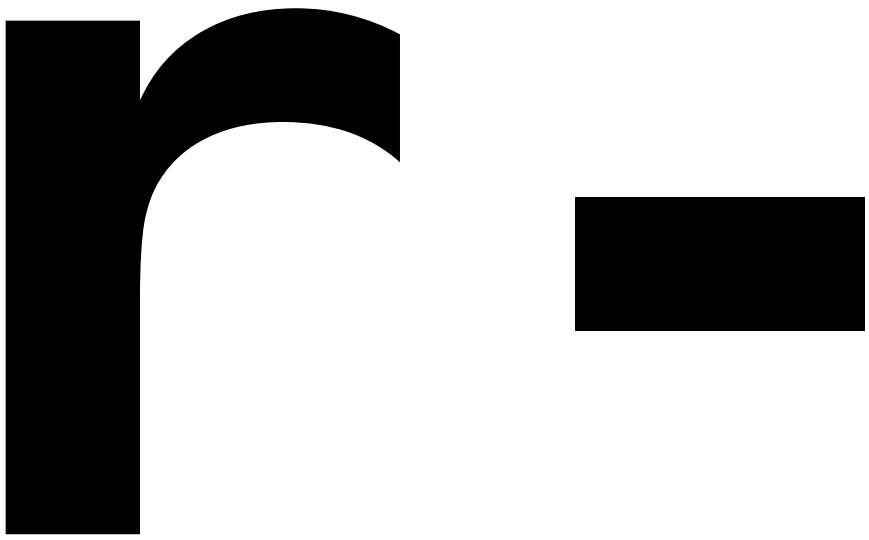
ra

et

se



de

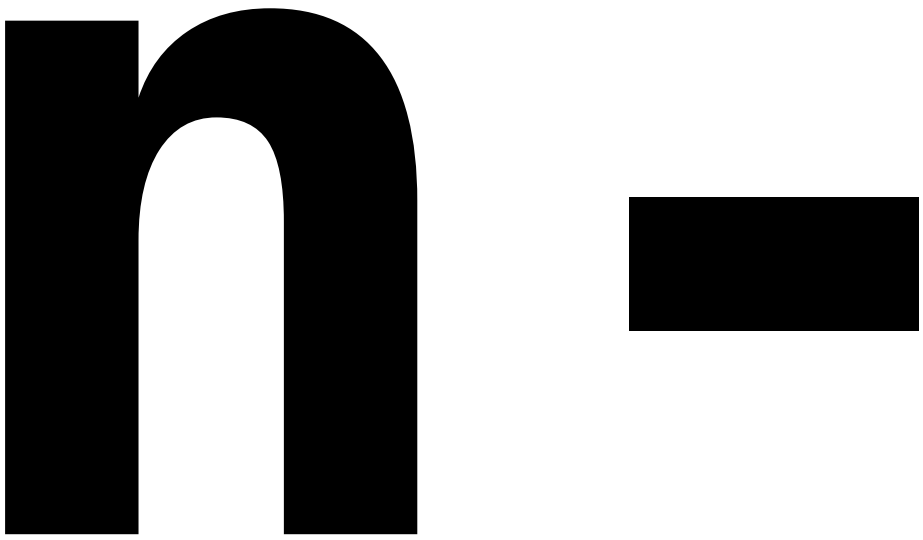


ei


SZ

ei

te



te



-7



gl

ob

al



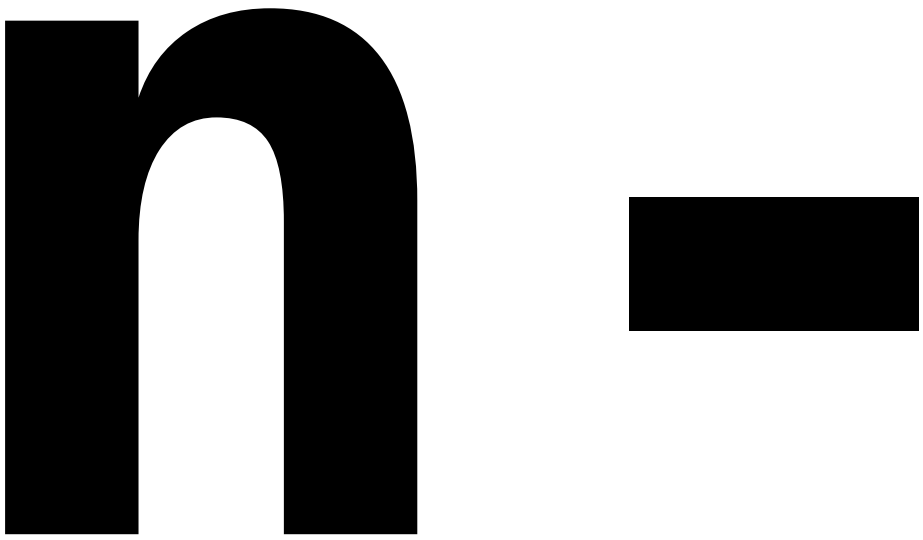

ci

rc



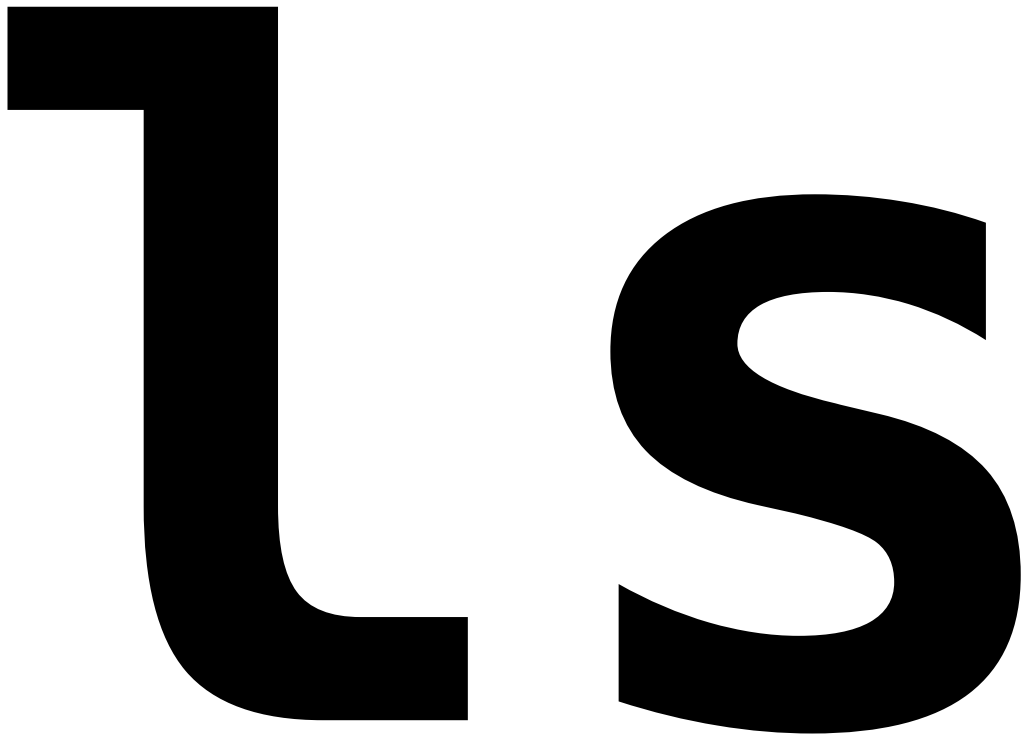
at

io

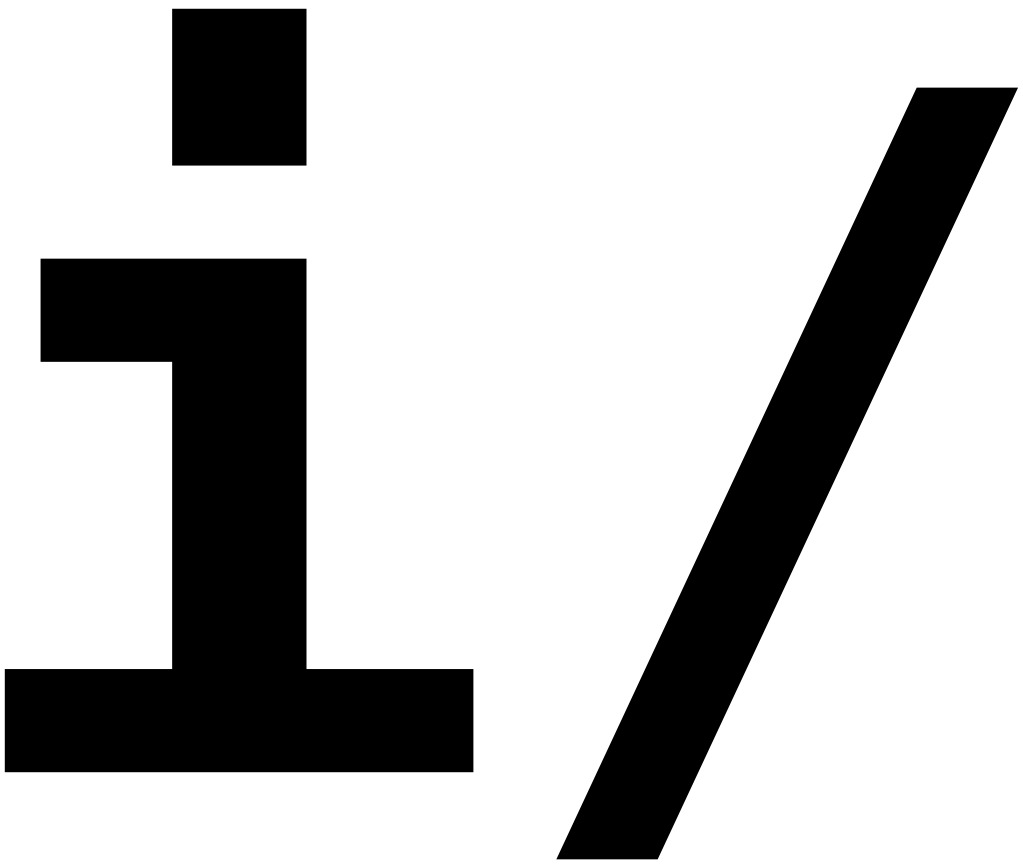


mo

de



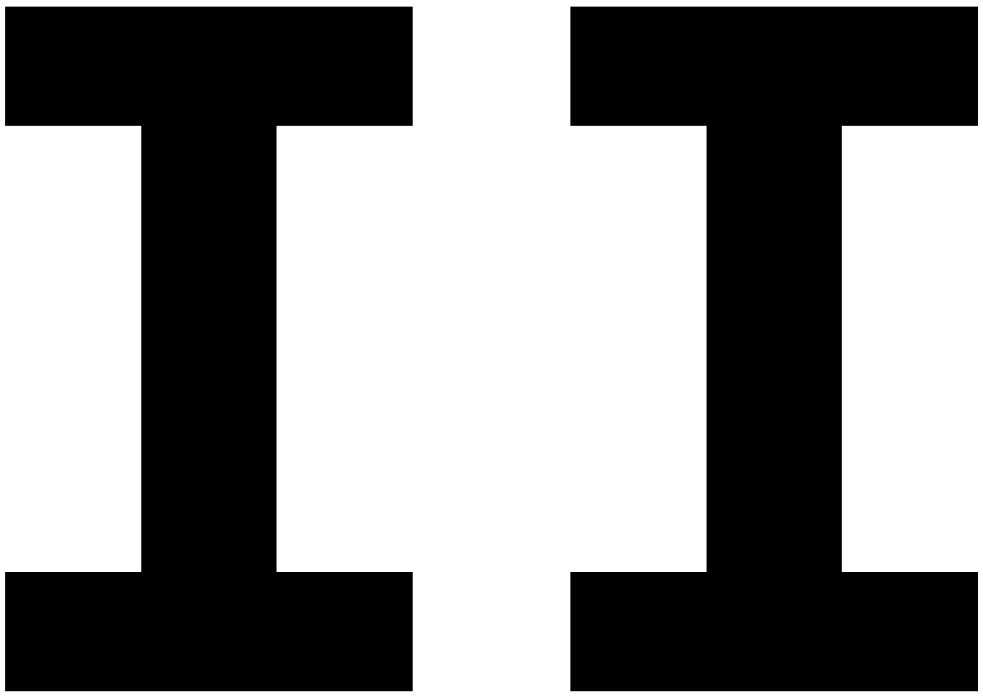


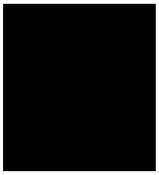


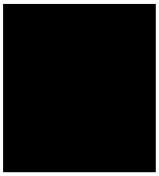
Te



VI







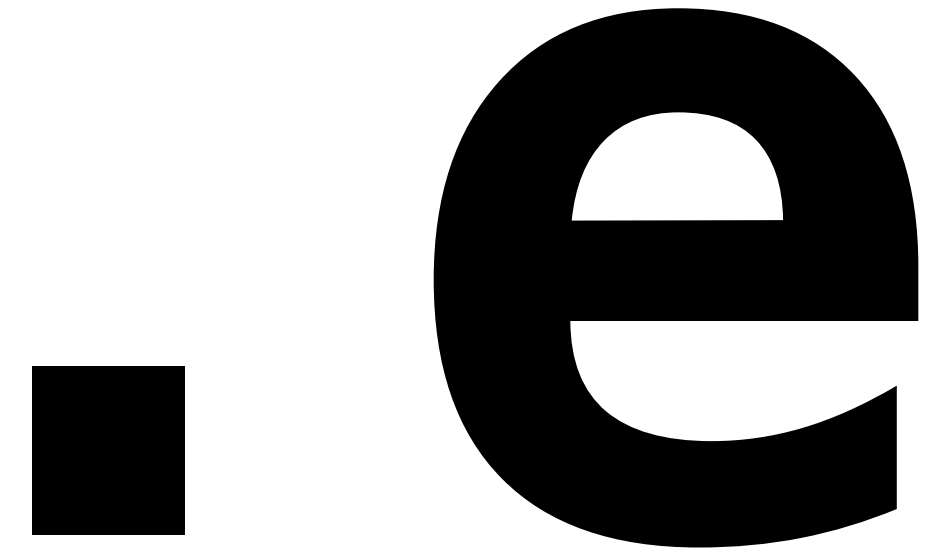

ht


tp



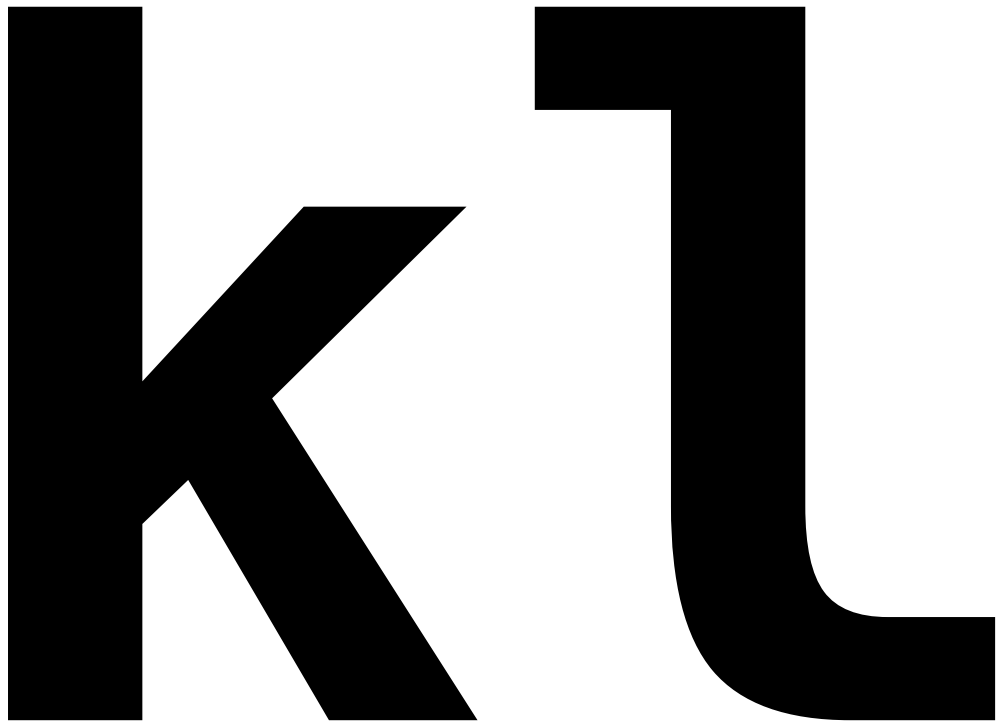








e-





a –

en

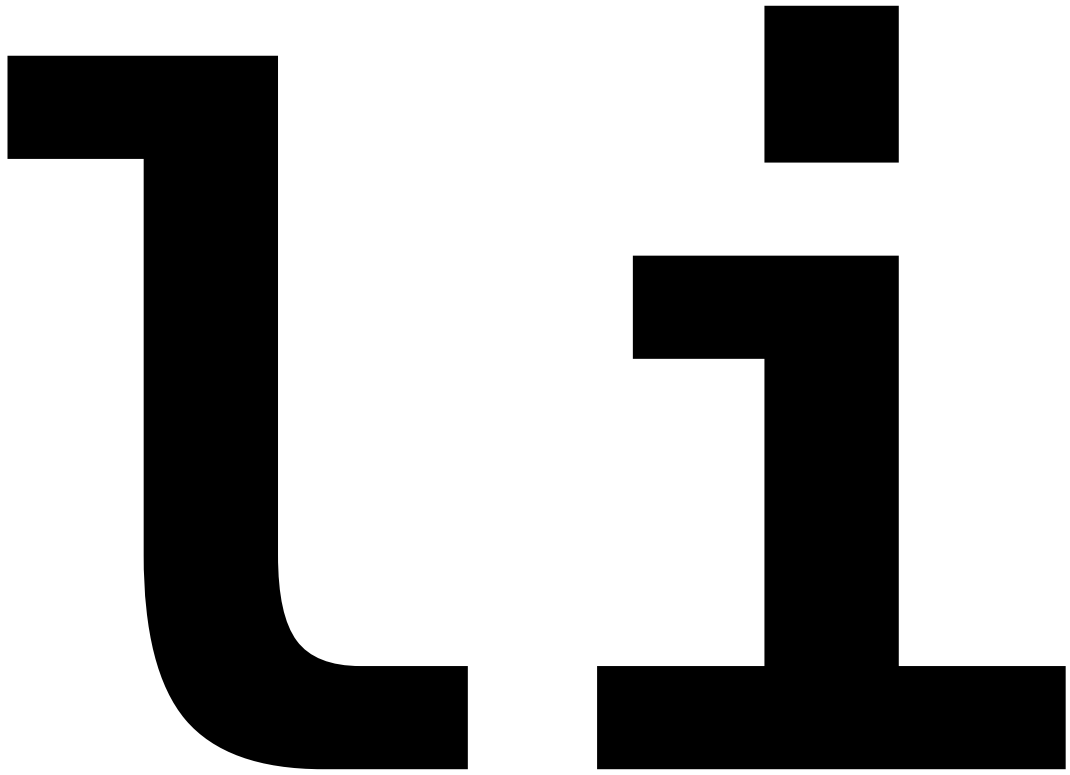
er

gi

e.

eu

/k



ma



an

ze


ig

e/

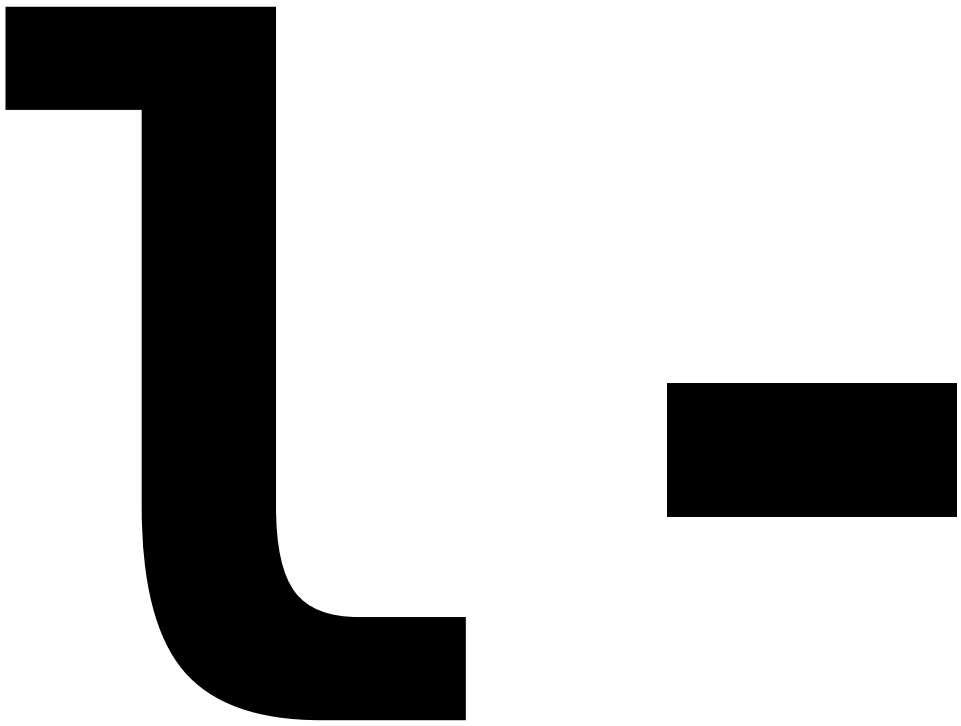
da



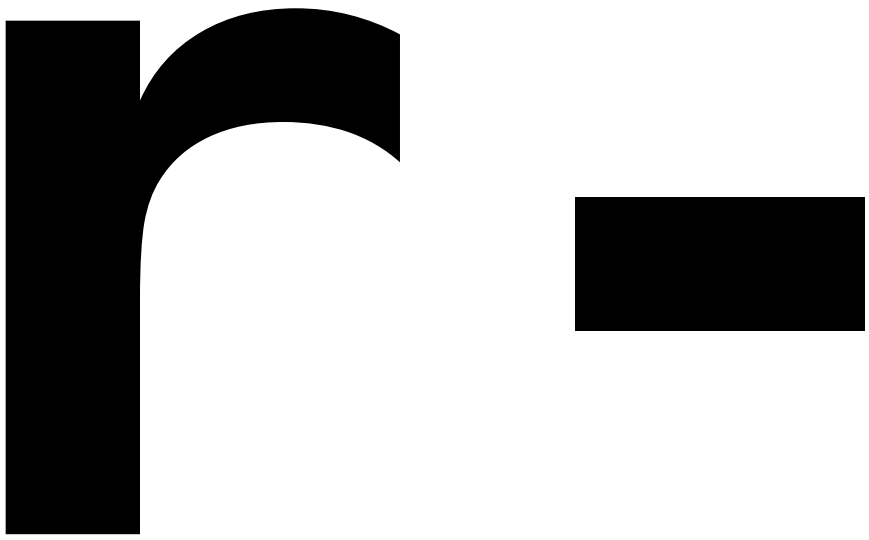
ra

et

se



de

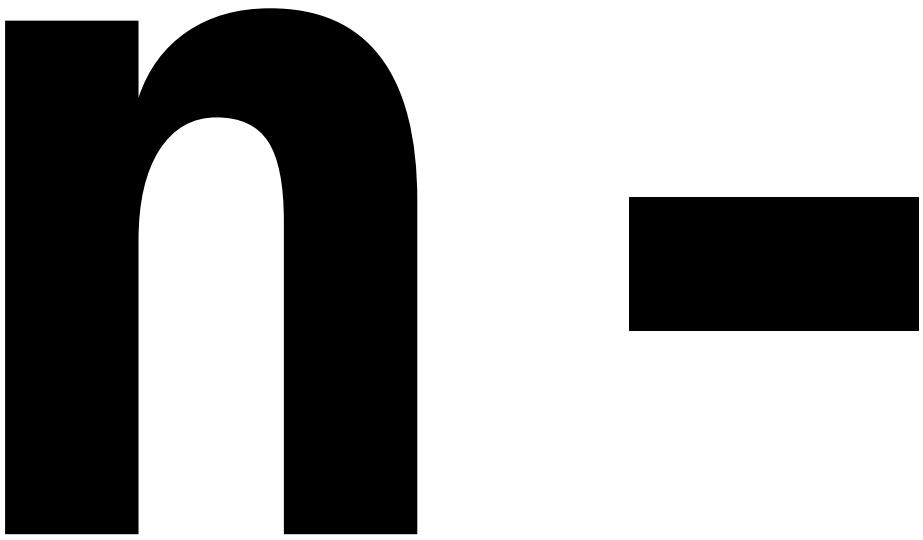


ei


SZ

ei

te



te



-8



gl

ob

al



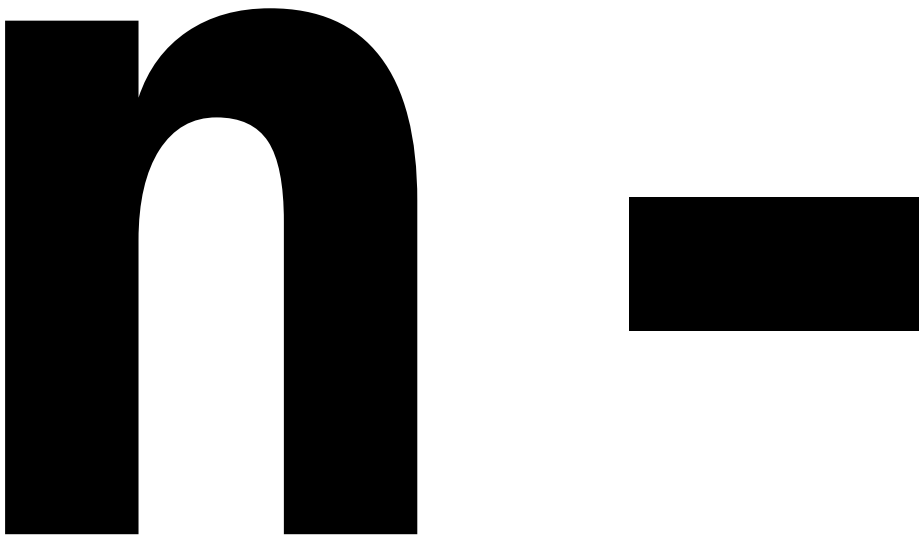

ci

rc



at

io



mo

de

