



## Genetik der Fellfarben

**Gen:** Bauplan auf der DNA, der für ein Protein codiert, welches eine Funktion im Körper übernimmt.

**Genotyp:** Gesamtheit aller Gene eines Tieres

**Phänotyp:** äussere sichtbare Merkmale die sich durchsetzen können

**Allel:** Kann ein Gen zu verschiedenen Farben führen, wird jede Möglichkeit „Allel“ genannt. Es gibt dominante und rezessive Allele. Man trägt nur zwei der möglichen Allele pro Gen.

**Mutation:** Veränderung in der Erbinformation. Verschiedene Allele an einem Genort sind durch Mutationen entstanden

**Homozygot:** die Katze trägt zwei identische Kopien des Gens

**Heterozygot:** sie trägt zwei verschiedene Varianten des Gens

**Locus/Loci:** Ort an dem sich ein Gen befindet auf der DNA

**Dominant:** Merkmal setzt sich durch und wird immer ausgeprägt im Phänotyp, Schreibweise: Grossbuchstabe

**Rezessiv:** Merkmal prägt sich nicht aus wenn auch das dominante Allel vorhanden ist, sondern nur wenn das Tier reinerbig ist für das rezessive Merkmal, Schreibweise: Klein

**Kodominant:** Mehrere vorhandene Merkmale prägen sich miteinander aus (z.B. Tricolor Calico Kätzinnen)

**Intermediär:** 2 Merkmale werden vermischt und eine dritte Form entsteht (z.B. Tonkanesen)

**Epistasie:** Die Merkmale eines Locus überdecken die Farben eines anderen Locus

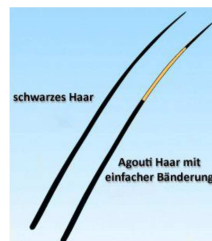
**Eumelanin:** Schwarzes Pigment (auch zu Braun aufgehellt)

**Phäomelanin:** rot/gelbes Pigment (O-Locus: Orange)

In jeder Zelle trägt die Katze 19 Chromosomenpaare, 18 Autosomenpaare und das Geschlechtschromosomenpaar (XX oder XY). Jeweils ein Chromosom kommt von der Mutter und eines vom Vater. Auf allen Chromosomen liegen Gene an verschiedenen Genorten. Ausser den Farben des O-Locus sind Fellfarben nicht geschlechtsgebunden, da die Gene dafür auf den Autosomen liegen. Der Melanozyt kann nur zwei Farben bilden, Eumelanin oder Phäomelanin. Alle Katzenfarben sind Variationen davon. Jedes Gen hat oft mehrere Allele. Setzt sich ein Allel im Erscheinungsbild gegen das andere durch, ist es dominant und wird mit einem Grossbuchstaben geschrieben. Eine Katze kann z.B. von der Mutter am Braun Locus ein Allel für chocolate Farbe tragen (b) und vom Vater ein Allel für Schwarz (B). Die Katze wird schwarz (Bb) sein, da das Allel für Schwarz am Brown Locus dominant ist. Die Katze ist hete-

<b>Vererbungsschema</b>	Vater BB (schwarz) homozygot
<b>Mutter bb (chocolate) homozygot</b>	Welpen Bb (schwarz) heterozygot

rozygot für Braun, das heisst, sie trägt zwei verschiedene Allele und kann mit einem anderen Braun-Träger auch braune Junge werfen. Es braucht zwei Chocolate Allele (bb) damit die Katze auch Chocolatefarben ist. Sie ist dann homozygot für Braun, da sie zweimal exakt die gleiche Erbinformation trägt an diesem Locus. Sie ist reinerbig für das b Allel. Braun ist also rezessiv, d.h. es ist nur sichtbar, wenn die Katze von beiden Eltern das Braun-Allel b geerbt hat.



**Bild 2** Agouti gebändertes Haar und nicht gebändertes Haar  
Quelle: Dr. Haase\_Vererbtes De-sign\_ProCat Event

### A-Locus Agouti ASIP Gen

Der Agouti Locus liegt auf Chromosom A3 und codiert im Normalfall für die Wildfarbe. Das Haar hat eine helle Grundfarbe und weist eine Bänderung mit schwarzen Banden

auf. Die Katze kann rötlich aussehen, getickt oder das Tabby Gen kann sich ausprägen und die Katze Streifenmuster zeigen. Ist das ASIP Gen mutiert und liegt zweimal die mutierte Kopie vor, ist die Katze rezessiv schwarz aa was aber noch zu Braun oder Blautönen aufgehellt werden kann durch den B oder D Locus. Man kann auch sagen, dass Non-Agouti (aa) einfarbige Katzen ohne Zeichnung sind, da ihr Tabby oder Ticking Gen unterdrückt wird. Nur der Orange Locus kann das Schwarz überdecken.

### B-Locus Brown (TYRP1-Tyrosinase related Protein)

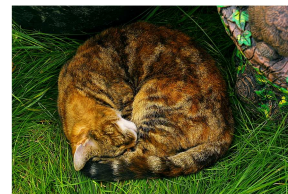
Das TYRP1 Gen liegt auf Chromosom D4. Es existieren 3 Allele. Das dominante Allel B des Gens führt zur schwarzen Fellfarbe der Katze. Sie produziert normales, schwarzes Eumelanin. Das Allel b führt zu einem teilweisen Funktionsverlust des Proteins, was zur Aufhellung des Eumelanins führt. Die Katze mit dem bb Genotyp ist Braun (Chocolate, Chestnut, Havana). Das letzte Allel b<sup>1</sup> führt im homozygoten Zustand zu Zimtfarbenen Katzen (Cinnamon, Sorrel, Honey). Die zwei Brauntöne können jeweils aufgehellt sein durch den D-Locus (Dilute). Die Bb Katze ist schwarz, trägt aber den Braunfaktor.

### D-Locus Dilute (MLPH Gen)

Eine Mutation im MLPH Gen führt zur Verklumpung des Melanins im Haar, es erscheint aufgehellt. Das dominante Wildtyp Allel D führt zu normaler Fellfarbe und das Allel d in homozygotem Zustand zur Aufhellung der Farben. Schwarz wird Blau, Braun wird Lavendel oder Lilac, Zimt wird Fawn oder Beige, Amber wird light Amber. Das Rot vom O-Locus wird zu Creme/Apricot aufgehellt.

Der Dilute Modifier Locus liegt wahrscheinlich auf einem anderen Gen, das dominante Allel D<sup>M</sup> hellt Blau zu Caramell und Lilac zu Taupe auf. Fawn/Beige wird nicht aufgehellt.

### Spezialfall: Der O-Locus (orange, X-Chromosom)



**Bild 1** Schildpatt Tabby (Torbie)  
(Aa, X<sup>O</sup>X<sup>o</sup>, T<sup>M</sup>T<sup>2</sup>)

Quelle:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Schildpattmuster>

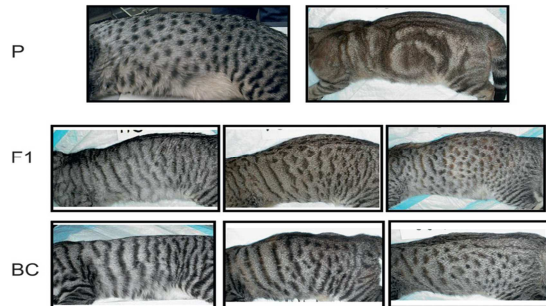
X-chromosomaler, kodominanter Erbgang: Eine weibliche Katze kann auf einem X Chromosom Orange tragen und auf dem anderen „kein Orange“ (X<sup>O</sup>X<sup>o</sup>), das ergibt einen Phänotyp mit zwei gemischten Farben. Da beim Weibchen jeweils ein X Chromosom in jeder Zelle unterdrückt wird, wird in den einen Zellen Orange produziert, und in den Anderen Schwarz. Das führt zu ganz verschiedenen Mustern. Beim normalen Kater gibt es nur ein X Chromosom, der Kater kann also nur ganz orange sein ODER gar kein Orange am Körper tragen. Ist ein Kater Schildpatt, trägt er zwei X Chromosomen und ist unfruchtbar (XXY).

Beim aa/oO Genotyp kann auch Blau, Braun, Zimt, Lilac, oder Fawn vorkommen anstelle von Schwarz und Apricot statt Orange am O-Locus, je nach Braun und Dilution Allele. Der Orange Locus ist epistatisch über das non-Agouti, die homozygote OO Katze ist Rot auch wenn sie aa für Schwarz am Agouti Locus trägt.

Bei Aa oder AA zeigt die Tortie Katze deutliches Tabbymuster  
**Torbie:** Tortie mit deutlichem Tabby Muster, oft mit Weiss  
**Tortoise Shell** (Schildkrötenpanzer): Kleine Bereiche derselben Farbe, zerrissene Flecken, viel Schwarz im Gesicht, kein Weiss  
**Calico/Tortie with White:** Grosse Bereiche mit derselben Farbe und weisse Abzeichen im Kopf-Brustbereich durch den S-Locus, kein Black Tabby Muster

## Tabby und Ticked Loci

Es gibt mindestens 3 verschiedene Genorte für Fellzeichnungen bei der Katze. Der Tabby Locus liegt auf Chromosom A1 und beinhaltet Mackerel  $T^M$ , Blotched  $t^b$ . Die Mackerel Streifen sind oft zu Tupfen aufgelöst. Dieser Locus ist noch unbekannt. Je nachdem wie stark der Spotted Locus wirkt, wird die Zeichnung zu broken mackerel aufgelöst oder zu einem reinen Tupfenmuster. Blotched ( $t^{b,t^b}$ ) mit spotted ( $T^M T^M$  oder  $T^M t^b$ ) verpaart ergibt broken makarel Tabbies. Bei Rückkreuzung eines Tochttertiers mit dem blotched Vater erhalten wir blotched Katzen, broken makarel und reine makarel Katzen. Tabbies können verschiedene Farben haben. Die Grundfarbe ist an den dunklen Bereichen zu sehen. Am häufigsten ist der „Black (auch Brown genannt) Tabby“.



**Bild 3** Tabby Muster bei Silver Tabbies  
P=Eltern Silver Spotted  $T^M$  x classic brown Tabby  $t^b$ , F1=Welpen broken makarel, Backcross Generation broken makarel x blotched ergibt auch reine makarel Welpen  
Quelle: *Defining and mapping mammalian coat pattern genes: multiple genomic regions implicated in domestic cat stripes and spots*; Eduardo Eizirik

Der Ticked Locus  $T^a$  für Abyssinian Ticking liegt auf Chromosom B1 wobei das Gen noch nicht gefunden, aber eine Region eingegrenzt werden konnte. Ticking ist epistatisch über das Tabby Muster, d.h. liegt das Ticking Allel vor, wird ein Tabbymuster überdeckt. Das Haar zeigt ein Bänderungsmuster und die Katze wirkt fein gepunktet.

### I-Locus Silver

Der Locus konnte auf dem Chromosom D2 lokalisiert werden, wobei das Gen noch nicht gefunden wurde. Das mutierte, dominante Allel I unterdrückt die Pigmentproduktion, vor allem die Ausbildung des Phäomelanins. Das braune Band, das vom Agouti Gen entsteht wird grau-weiß, die schwarzen Streifen werden nicht beeinflusst. Ein Black Tabby wird zum Silver Tabby. Die Streifen können auch Blau, Rot oder Creme-farben sein. Rot wird Red Silver Tabby oder Cameo Tabby genannt. Heterozygote Katzen sind auch Silber, nur homozygote ii Katzen können Phäomelanin in die Haare transportieren und Tabbymuster mit Brauntönen aufweisen.

### E-Locus Extension MC1R Melanocortin Receptor 1



**Bild 4** Norwegische Waldkatze in Amber  
Quelle:  
<http://www.vombergwald.de/deutsch/benny.htm>

Der Locus liegt auf Chromosom E2 und Mutationen existieren nur in der Norwegischen Waldkatze und diversen Wildkatzen wie dem Jaguar. Die Mutation im MC1R Gen für Amber lässt sich zurückverfolgen auf eine 1981 geborene Kätzin. Der Rezeptor ist involviert in den Wechsel zwischen Eumelanin- und Phäomelaninproduktion. Beim Hund führt eine Mutation am MC1R Gen zu rezessiv gelben Labrador Retrievern. Das rezessive e Allel führt bei der Katze zu beige-rötlichen bis braun-rauchigen

Farbtönen. Welpen werden mit schwarz/braunem Tabby Muster geboren und werden später goldfarben aufgehellt. Es gibt Tabby, Smoke, Tortie in Amber oder Light Amber. Wenn die Katze das Orange Allel O doppelt trägt, kann sie kein Amber ausprägen. Trägt sie ee und ist heterozygot für orange, zeigt sie ein Schildpatt Muster in Rot/Amber. Kater können nur amberfarben sein, wenn sie auf ihrem X Chromosom das Allel o für „kein Rot“ tragen.

### C-Locus Albinismus Tyrosinase

Beim Albinismus produzieren die Melanozyten kein oder zu wenig Melanin. Katzen mit dem dominanten C Allel sind normal gefärbt. Rezessiv weisse Katzen cc sind selten, bekannter sind Teilalbinos, die Colourpoints. Durch Mutationen im Tyrosinase Gen kommen Siam Point Zeichnung  $c^s$  und Burmesen Farbe  $c^b$  zustande. Der Genotyp  $c^s c^b$  führt zum Tonkanesen Phänotyp, der meist eine Mischung aus beiden Phänotypen darstellt. Die mutierte Tyrosinase beim  $c^s$  Allel lässt Pigmentbildung nur in den kühleren Körperregionen zu, wie an den Ohren, Nase, Beinen, Schwanz, welche somit dunkler erscheinen. Die Farbe der Points ist sehr variabel, sogar Tabby Muster kommt vor. Die Welpen kommen weiss zur Welt und dunkeln an den beschriebenen Stellen nach. Pointzeichnung kann in diversen Rassen auftreten. Melanin spielt auch eine Rolle bei der Entwicklung der Sehnerven. Die optischen Eindrücke werden nicht gleichmässig an die beiden Hirnhälften weitergegeben, das räumliche Sehen ist eingeschränkt. Es entstehen Nystagmus (Augenzittern) und Strabismus (Schielen). Durch die veränderte Projektion der Reize auf die Sehrinde, sind die visuomotorischen Reflexe gestört. Die Katze kann zum Beispiel kaum eine Maus fangen. (Quelle: Serendipity and the Siamese cat: the discovery that genes for coat and eye pigment affect the brain.



**Bild 5:** Siam und Tonkanesen Färbung  
Quelle:  
[http://www.sheba.at/de/mythos\\_katze/katzenrasen/\\_images/gallery\\_c\\_at\\_tonkanese.jpg](http://www.sheba.at/de/mythos_katze/katzenrasen/_images/gallery_c_at_tonkanese.jpg)

Kaas JH; Department of Psychology, Vanderbilt University, Nashville, TN, USA <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>

### W-Locus dominant Weiss und S-Locus Scheckung: Leuzismus

Wandern keine farbgebenden Zellen in die Haut ein, spricht man nicht von Albinismus sondern von Leuzismus. Das Weiss bei Calicos oder die weisse Brust bei schwarzen Katzen entstehen durch Fehlen von Melanozyten an diesen Stellen. S ist dominant und verursacht Scheckung. Homozygote SS Katzen, wie z.B. die Van, zeigen mehr Weiss als Heterozygote Ss. Man



Seal Tortie Point with White



Seal Tortie Point with White

**Bild 6** Katze mit Van Zeichnung SS und Tortie with White Ss  
Quelle: <http://www.showcatsonline.com/x/colors-with-white.shtml>

vermutet, dass ein W-Locus existiert, der auch zu gänzlich weissen Katzen mit blauen oder verschiedenfarbigen Augen führt. Bei fast weissen Katzen wie der Van und dominant

weissen Katzen (W) mit blauen Augen kann Taubheit auftreten, da auch Nervenzellen im Innenohr fehlen. Die Pigmentzellen stammen aus derselben Zelllinie wie gewisse, periphere Nervenzellen. Wandern beim Embryo zu wenig oder keine dieser Zellen von der Wirbelsäule zum Rest des Körpers, führt dies zu weisser Fellfarbe und Fehlen von Nervenzellen im Innenohr. Das fehlende Pigment in weissen Katzen kann weiter zu einer Verkümmernung des Tapetum lucidum im Auge führen. Das Tapetum lucidum ist ein lichtreflektierendes Feld im Augenhintergrund. Die ins Auge einfallenden Lichtstrahlen werden vom Tapetum lucidum verstärkt an die Retina weitergeleitet, so dass die Katze im Dunkeln besonders gut sieht.

Obwohl das Züchten mit weissen Katzen nicht empfohlen wird, gibt es die Foreign White, eine Katze mit tiefblauen Augen, die aus Siamesen und Balinesen hervorgeht. Sie ist reinerbig für das Point Gen  $c^s$ . Patricia Turner wollte in den 60er Jahren die Taubheit in weissen Katzen verringern und begann deshalb weisse Katzen mit Siamesen zu kreuzen. Ihr Zuchtziel bestand darin, weisse Katzen zu züchten, welche die blauen Augen durch das Siamesen Gen  $c^s$  erhalten. Somit würden auch weniger taube Katzen entstehen, da bei Siamesen Taubheit nicht vorkommt.

Bei Foreign White Katzen besteht die Möglichkeit, die blauen Augen in zwei Gruppen aufzuteilen:

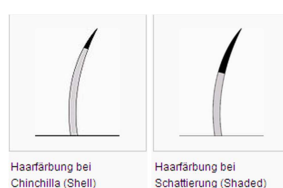
- Das blaue Auge, das zum W-Gen (weißes Fell) gehört und kein Tapetum lucidum hat. Seine Farbe wird "weiß-blau" genannt.
- Das blaue Auge, das zum Allelpaar  $c^s c^s$  (Siamzeichnung) gehört und fast immer ein Tapetum lucidum aufweist. Die Farbe nennt man "Siam-blau" oder "Turner-blau".

(Quelle: <http://www.katzengenetik.com/2011/01/17/turner-blue-und-foreign-white>)

Das Ziel der Foreign White Züchter war, nur Katzen mit Tapetum lucidum zur Zucht einzusetzen. Nach neuesten Statistiken ist man aber wieder davon abgekommen. Erschwerend kommt hinzu, dass man das Tapetum lucidum nur ophthalmologisch nachweisen kann und Züchter ihre Tiere verpaaren, ohne zu wissen ob die Katze Siam-blaue oder weissblaue Augen hat. Eine ophthalmologische Untersuchung an 39 Foreign Whites hat ergeben, dass nur 30% die Turner-blaue Augenstruktur hatte. (M. Raadsveld, **Het Syndroom Van Waardenburg Bij De Foreign White Kat**, 1977, Faculteit de Diergeneeskunde, Utrecht):

- 24 Foreign Whites hatten beiderseits kein Tapetum lucidum
- 6 Foreign Whites hatten das Tapetum lucidum einseitig, F.W. odd-eyed,
- 9 Foreign Whites hatten das Tapetum lucidum in beiden Augen.

Chinchilla/Shaded: Breitband Locus  $W^b$



**Bild 7** Chinchilla und Shaded

Quelle:

[http://de.wikipedia.org/wiki/Felfarben\\_der\\_Katze](http://de.wikipedia.org/wiki/Felfarben_der_Katze)

„Wide Band“ ist ein Locus der wissenschaftlich noch nicht erforscht wurde und oft dem Inhibitor Locus I untergestellt wird, da er erst nur zusammen mit Silber vererbt wurde. Die Vermutung liegt aber nahe, dass es sich um ein Zusammenspiel von mehreren Genen handelt. Agouti ist für die Bänderung des Haars verantwortlich, der I locus hemmt die Phäomelaniausbreitung und

ein weiteres Gen lässt die Bandenbreite des Haars variieren. Der Vererbungsmodus ist inkomplett dominant. Die Aufhellung verstärkt sich im Homozygoten Tier. Es gibt neben Silver Tabbies auch Silver Chinchilla (Wb/Wb homozygot) und Silver Shaded (Wb/- heterozygot) Katzen. Durch Zuchtversuche mit Silver Tabbies, die Breitband vererben und Black Tabbies entstanden die Golden Tabbies (Wb/- heterozygot) und Golden Shaded (Wb/Wb). Ein Golden Tabby mit dem Shaded Allel hat auf seinem Haar einen breiteres Phäomelaninband und hellt in einem Jahr stark auf. Als Welpen ist es kaum von einem Black Tabby zu unterscheiden. Es gibt Katzen, die schwarz aussehen, zuunterst



**Bild 8** Golden Tabby

Quelle:

<http://forum.deutschlanghaar-katzen.de/>

am Haarschaft aber ein dünnes, helles Band zeigen, was nur beim Teilen des Fells sichtbar wird. Diese Farbvariation wird Smoke genannt und muss wohl einem weiteren, unbekanntem Locus zugeschrieben werden, der das Phäomelaninband wiederum stark verkleinert. Rote Smoke Katzen werden Cameo genannt. Über die Vererbung und Loci von Chinchilla, Shaded und Smoke gibt es so viele Theorien wie Katzenzüchter.

Sheila Schmutz aus Kanada und viele weitere Wissenschaftler forschen aktiv an der Hunde- und Katzenfarbgenetik.

Auf ihrer Homepage findet man alles, was wissenschaftlich bereits erforscht ist:

**Homepage von Sheila M. Schmutz:**

<http://homepage.usask.ca/~schmutz/catcolors.html>

(med. vet. Regula Hauswirth)

Weitere Quellen:

**Albinism in the domestic cat (*Felis catus*) is associated with a tyrosinase (TYR) mutation**

DL Imes, LA Geary, RA Grahn, and LA Lyons

**Tyrosinase mutations associated with Siamese and Burmese patterns in the domestic cat (*Felis catus*)**

L. A. Lyons, D. L. Imes, H. C. Rah, R. A. Grahn Article first published online: 31 MAR 2005

**Defining and mapping mammalian coat pattern genes: multiple genomic regions implicated in domestic cat stripes and spots;** Eduardo Eizirik, Victor A. David, Valerie Buckley-Beason, Melody E. Roelke, Alejandro A. Schäffer, Steven S. Hannah, Kristina Narfström, Stephen J. O'Brien and Marilyn Menotti-Raymond

**A homozygous single-base deletion in MLPH causes the dilute coat color phenotype in the domestic cat**

Yasuko Ishidaa, Victor A. Davida, Eduardo Eizirik, Alejandro A. Schäffer, Beena A. Neelam, Melody E. Roelke, Steven S. Hannah, Stephen J. O'Brien, Marilyn Menotti-Raymond

**Mutation in the melanocortin 1 receptor is associated with amber colour in the Norwegian Forest Cat**

M. Peterschmitt1, F. Grain1, B. Arnaud1, G Deléage2, V. Lambert1

- <http://www.katzengenetik.com/2011/01/17/turner-blue-und-foreign-white>
- <http://fanciers.com/other-faqs/color-genetics.html>
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Bildtafel\\_Katzenrassen](http://de.wikipedia.org/wiki/Bildtafel_Katzenrassen)

