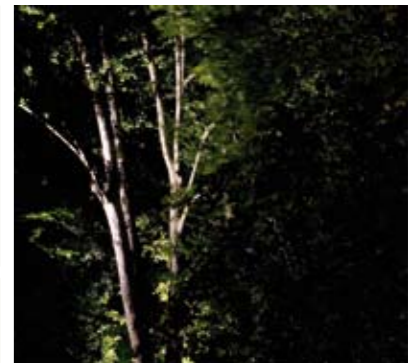




GRUNDLAGENBERICHT
ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN
KÜNSTLICHER BELEUCHTUNG

SWILD – Stadtökologie, Wildtierforschung, Kommunikation



EDITORIAL

Mit Licht und Schatten sorgfältig umgehen

Die Welt ist im letzten Jahrhundert immer heller geworden. Wenn es Nacht wird, beginnen tausende künstliche Lichtquellen zu strahlen. Ausgehend von den Städten, Ortschaften, Gebäuden und Strassen bis hin zu den Bergbahnen im Gebirge erobern nächtliche Lichtkonzentrationen die Landschaft. Licht bedeutet Attraktivität und Sicherheit – die Stadt Zürich ohne Licht wollen wir uns nicht mehr vorstellen.

Die künstliche Beleuchtung hat jedoch auch ihre Schattenseite. Seit das Licht nachts Einzug gehalten hat, haben sich die Lebensbedingungen vieler Tiere und Pflanzen verändert. Ihr natürlicher Tag-Nacht-Rhythmus wird gestört, Zugvögel verlieren die Orientierung und Glühwürmchen finden keine Geschlechtspartner mehr. Ein spektakulärer Teil der Natur wird auch uns Menschen vorenthalten: die Pracht des Sternenhimmels ist nur mehr in entlegenen Gebieten zu bewundern, und die Milchstrasse kennen viele Menschen nur noch vom Namen her.

Grün Stadt Zürich wünscht sich anstelle des ungezielt verstreuten Lichtes einen umweltverträglichen Umgang mit Licht: Künstliche Beleuchtung ja, aber gezielt und überlegt eingesetzt.

Wie wirken sich Lichtemissionen genau auf Flora und Fauna aus, und wie können wir den negativen Auswirkungen begegnen? Zur Beantwortung dieser Frage haben das Amt für Städtebau und Grün Stadt Zürich eine Studie in Auftrag gegeben. Das Resultat ist die erste umfassende, deutschsprachige Wissenssammlung zum Thema. Die Literaturstudie dient als Grundlage für ein Merkblatt, das dem Zürcher Beleuchtungskonzept Plan Lumière den notwendigen ökologischen Glanz verleiht. Darin finden sich Empfehlungen und konkrete Handlungsmöglichkeiten für einen ökologischen Umgang mit Licht.

Die vorliegende Studie ist ein schönes Beispiel der erfolgreichen Zusammenarbeit des Amtes für Städtebau und Grün Stadt Zürich. Ich hoffe, dass die Erkenntnisse der Studie möglichst breite Wirkung entfalten werden, und freue mich darauf, in Zukunft eine Stadt Zürich zu erleben, die den sorgfältigen Umgang mit Licht und Schatten pflegt und sich damit ins rechte Licht rückt.

Karin Hindenlang

Geschäftsbereichsleiterin Naturförderung
Grün Stadt Zürich

INHALTSVERZEICHNIS

Editorial Herausgeberin	1
1 Zusammenfassung: Ökologische Auswirkungen künstlicher Beleuchtung	7
Effekte von Licht auf Pflanzen, Tiere, Mensch und Lebensgemeinschaften	7
Pflanzen	7
Wirbellose	8
Fische	8
Amphibien und Reptilien	9
Vögel	9
Säugetiere.	10
Menschen	10
2 Einführung.	11
Lichtverschmutzung – Lichtimmission.	11
3 Methoden	12
Verwendete Literatur und Grundlagen	12
Übersichtsdarstellungen.	12
Spezifische Untersuchungen	12
Einzelereignisse, Zitate von Personen.	12
Beurteilungen, Empfehlungen	12
4 Auswirkungen von Licht auf Pflanzen, Tiere und Menschen	13
Allgemeine Grundlagen	13
Naturtag synchronisiert circadiane Rhythmik.	13
Lichtintensitätsänderungen bestimmen endogene Rhythmik.	13
Licht beeinflusst Periodenlänge von Tagesrhythmus	13
Gen für die innere Uhr	14
Ökologischer Vorteil des Photoperiodismus	14
Auswirkungen der Lichtqualität	15
Beleuchtungsstärke und ihre Auswirkungen	15
Hell-Dunkel-Adaptation des menschlichen Auges	16
Reaktionen von Insekten auf UV-Licht und Licht blauer Wellenlänge (bis ca. 490 nm)	16
Reaktion von Tieren auf Licht im grünen bis roten Wellenbereich	17
Indirekter Effekt von unterschiedlichem Licht auf Fledermäuse	18
Licht blauer Wellenlänge und Melatonin beim Menschen	18
Effekte von Licht auf Pflanzen	20
Allgemeine Bedeutung von Tageslicht für Pflanzen	20
Tageszeitlicher Rhythmus im Naturtag	20
Tageslänge löst Blütenbildung aus	21

Anpassung an die Tageslänge der geografischen Breite	21
Reaktion auf Lichtspektrum	21
Photorezeptoren reagieren auf Umgebungslicht.	22
Auswirkung von künstlicher Nachtbeleuchtung noch unerforscht	22
Effekte von Licht auf Tiere	22
Artspezifische Phototaxis.	22
Photoperiodische Effekte auf Insekten	23
Mondlicht steuert Entwicklungszyklen von Zuckmücken	23
Lichtabhängige Vertikalwanderung des Zooplanktons	23
Photoperiodische Effekte auf Schnecken	23
Lichtempfindliches Hirnorgan bei Echsen	24
Lichtdurchlässige Schädeldecke bei Vögeln	24
Lichteinfluss auf Melatonin-Produktion bei Säugetieren	24
Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Tiere und den Menschen	25
Invertebraten (Wirbellose).	25
<i>Anziehung von Fluginsekten.</i>	<i>25</i>
<i>Anlockwirkung auf Wasserinsekten.</i>	<i>25</i>
<i>Mechanismus der Anlockwirkung von Insekten und Konsequenzen</i>	<i>25</i>
<i>Anziehung und Meidung bei Spinnen</i>	<i>26</i>
<i>Veränderung der Vertikalwanderung von Wasserflöhen</i>	<i>26</i>
<i>Kommunikation bei Glühwürmchen.</i>	<i>26</i>
Fische	26
<i>Lichtabhängigkeit der Reproduktion</i>	<i>26</i>
<i>Aktivitätsänderungen.</i>	<i>27</i>
<i>Künstliche Beleuchtung als Leitsignal.</i>	<i>27</i>
<i>Anziehung von Feinden</i>	<i>27</i>
Amphibien	28
<i>Blendung – Anziehung – Vermeidung von Licht</i>	<i>28</i>
<i>Verändertes Fortpflanzungsverhalten</i>	<i>28</i>
Reptilien	28
<i>Desorientierung von Meeresschildkröten.</i>	<i>28</i>
<i>Aktivitätsanpassung – Beutefang – Risiko</i>	<i>29</i>
Vögel	29
<i>Lichtregime beeinflusst Reproduktion bei Hühnern.</i>	<i>29</i>
<i>Kombination von Licht und Nebel als Gefahr für Zugvögel – Mechanismus.</i>	<i>29</i>
<i>Zugvögel im Lichtdom über Agglomerationen</i>	<i>30</i>
<i>Zugvögel in der Lichtsphäre von kleineren beleuchteten Arealen</i>	<i>30</i>
<i>Towerkill</i>	<i>30</i>
<i>Kollision mit erleuchteten Wolkenkratzern</i>	<i>31</i>
<i>Fehlgeleitete Meeresvögel</i>	<i>31</i>
<i>Reaktion auf plötzliche Lichtreize</i>	<i>32</i>
<i>Vogelgesang zu Unzeiten.</i>	<i>32</i>
<i>Strassenlicht und Nestdichte bzw. Brutbeginn von Uferschnepfen.</i>	<i>32</i>
<i>Schlafplätze im Schutze des Lichts?.</i>	<i>33</i>

Säugetiere	33
<i>Künstliches Nachtlicht und innere Uhr</i>	33
<i>Lichtregime und Melatonin in der Tierproduktion</i>	33
<i>Lichtscheu</i>	34
<i>Fassadenbeleuchtung – eine Bedrohung für Fledermäuse?</i>	34
<i>Attraktion durch Beuteansammlung?</i>	35
<i>Blendung und ihre Auswirkungen</i>	35
Menschen	36
<i>Rezeptorzellen für die biologische Uhr</i>	36
<i>Blaues Licht in der Nacht und Melatonin-Produktion</i>	37
<i>Melatonin reguliert und schützt</i>	37
<i>Melatonin und Krebs im Tierversuch</i>	37
<i>Nachtlicht und menschliche Gesundheit</i>	38
<i>Mechanismus der Schutzwirkung von Melatonin</i>	38
Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Lebensgemeinschaften	39
<i>Zwischenartliche Konkurrenz</i>	39
<i>Nischendifferenzierung und Diversität bei künstlichem Nachtlicht</i>	39
<i>Begünstigung von Fledermausarten durch Strassenbeleuchtung</i>	39
<i>Räuber-Beute-Verhalten</i>	40
<i>Vorteil und Nachteil von künstlichem Nachtlicht</i>	40
<i>Lichtbeeinflusste Beuteansammlung zieht Feinde an</i>	40
<i>Feinderkennung durch künstliches Licht verunmöglicht.</i>	41
Folgerungen aus den Literaturgrundlagen	41
<i>Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Pflanzen</i>	41
<i>Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Tiere</i>	41
<i>Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Lebensgemeinschaften und bedrohte Arten</i>	42
<i>Barriereeffekt von künstlichem Nachtlicht</i>	42
<i>Ökosystem-Effekt von künstlichem Nachtlicht</i>	43
<i>Einfluss von Beleuchtungsstärke</i>	43
<i>Einfluss von Licht unterschiedlicher Wellenlänge</i>	43
5 Beurteilung künstlicher Beleuchtung im Siedlungsraum	45
Naturnahe Lebensräume	45
<i>Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht</i>	45
<i>Beurteilung</i>	46
Hochhäuser, Hochkamine	46
<i>Auswirkungen beleuchteter Hochhäuser und Vogeltod</i>	47
<i>Auswirkungen beleuchteter Hochkamine und Vogeltod</i>	47
<i>Nachtzug von Vögeln im schweizerischen Mittelland</i>	48
<i>Beurteilung</i>	48
Gebäude, Einzelobjekte	49
<i>Auswirkungen angestrahlter oder beleuchteter Gebäude</i>	49
<i>Beurteilung</i>	50

Brücken	51
Auswirkungen beleuchteter Brücken auf Vögel	51
Auswirkungen beleuchteter Brücken auf Wasserinsekten und Fische	51
Beurteilung	52
Skybeamer, Laseranlagen	52
Auswirkungen von Skybeamern	52
Verbote von Skybeamern	53
Beurteilung	54
Strassen als lineare Lichtelemente	54
Auswirkungen von linearen Lichtelementen	55
Beurteilung	55
6 Umweltverträgliche Beleuchtung	56
Lichtqualität	56
Kriterien zur Wahl der Lampentypen	56
Umweltverträglichkeit verschiedener Lampentypen bezüglich ihrer spektralen Zusammensetzung	57
<i>Natriumdampf-Niederdrucklampe (LST)</i>	57
<i>Natriumdampf-Hochdrucklampe (HST oder HSE)</i>	57
<i>Leuchtstofflampe (T-Lampe) und Kompakt-Leuchtstofflampe (TC, «Energiesparlampe»)</i>	57
<i>Quecksilberdampf-Hochdrucklampe (HME)</i>	58
Lichtquantität	59
Beleuchtungsstärke	59
Leuchtdichte	59
Lichtlenkung	59
Grundsätze und Empfehlungen	60
Abklärungen über Umweltverträglichkeit	61
Lichtimmission allgemein vermindern	61
Anpassung der Beleuchtung an ökologisch verschiedene Stadtgebiete	62
Anpassung der Beleuchtung an die Saison	62
Ökologisch verträglichste Beleuchtung einsetzen	63
Forschungsbedarf und Monitoring	63
7 Literatur	65
8 Glossar	72
9 Anhang	76
Gesetzliche Grundlagen in der Schweiz	76
Eingesetzte Lampen am Beispiel der Stadt Zürich	77

1 ZUSAMMENFASSUNG: ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN KÜNSTLICHER BELEUCHTUNG

Lichtmissionen durch künstliche Beleuchtung nehmen seit Jahren weltweit exponentiell zu – und damit auch die negativen ökologischen Auswirkungen. Aufgrund einer umfassenden Literaturstudie wurden die biologischen und medizinischen Aspekte – nicht aber ästhetische oder technische Aspekte – zusammengefasst, um als Grundlage einer ökologischen Beurteilung künstlicher Beleuchtung zu dienen.

Effekte von Licht auf Pflanzen, Tiere, Mensch und Lebensgemeinschaften

Alle Organismen, d.h. Bakterien, Algen, Pilze, Pflanzen, Tiere und natürlich auch der Mensch haben sich im Laufe der Evolution an den Tag-Nacht-Wechsel angepasst und verfügen über eine ausgeprägte physiologische Uhr (innere Uhr). Diese wird hauptsächlich durch das Licht des natürlichen Tag-Nacht-Wechsels auf den 24-h-Rhythmus (circadianer Rhythmus) eingestellt. Die meisten Tiere und Pflanzen sind zudem in der Lage, ihre innere Uhr an die sich ändernden Tageslängen (Photoperiode) innerhalb des Jahres anzupassen. Die Steuerung durch die Tageslänge ermöglicht eine Reihe ökologischer Vorteile. Es ist beispielsweise für Tiere von Vorteil, ihre Jungen bei günstigen Umweltbedingungen aufzuziehen, und für Pflanzen, nicht im Winter zu blühen.

Künstliche Beleuchtung kann sich auf verschiedene Pflanzen- und Tierarten unterschiedlich auswirken. Während die lichttoleranten Arten von künstlichem Nachtlicht profitieren, sich anpassen können oder nicht davon betroffen sind, kann es für lichtempfindliche Arten eine Reduktion ihrer Überlebensfähigkeit bedeuten oder bis zu einem Sterberisiko werden. Künstliche Beleuchtung kann den Lebensraum von Tierarten zerschneiden und ihren Aktionsradius und dadurch das Nahrungsangebot einschränken. Sie kann auch zur veränderten Konkurrenz und Räuber-Beute-Beziehung zwischen Arten führen. Durch diese Auswirkungen kann es zur schleichenden Artenverschiebung innerhalb einer Lebensgemeinschaft kommen. Bei bedrohten Arten muss ein Rückgang oder gar das Aussterben von kleinen, isolierten Populationen befürchtet werden, besonders dort, wo Lebensräume durch die städtische Entwicklung zerschnitten werden.

Pflanzen

Bei Pflanzen nehmen Photorezeptoren das Licht wahr und steuern dadurch Prozesse wie das Stellen der inneren Uhr, Samenkeimung, Stängelwachstum, Blattausdehnung, Übergang vom vegetativen in den Blühstatus, Blütenentwicklung, Fruchtentwicklung und Alterung. Neben dieser jahreszeitlichen Rhythmik lässt sich auch ein Tagesrhythmus, beispielsweise in der Atmungsaktivität und im zellulären und organismischen Stofftransport, erkennen. Die entscheidende Bedeutung von Belichtungszeitpunkt und -dauer für Pflanzen kann in Versuchen gezeigt werden: Im Dauerlicht (24 h) erlahmt das Photosynthesevermögen bei manchen Arten. Störlicht in der Mitte der Dunkelperiode kann bei den einen Pflanzen die Blütenbildung verhindern, während bei anderen die optimale Blütenbildung anregt wird.

Bis heute wurden unzählige Untersuchungen ausgeführt, welche die Mechanismen sowie Wechselwirkungen von Lichtwahrnehmungen und Tagesrhythmen bei Pflanzen zum Thema haben. Genauere Untersuchungen über die Auswirkung der längeren Photoperiode durch künstliche Nachtbeleuchtung auf Pflanzen in natürlicher Umgebung fehlen jedoch.

Wirbellose

Bei Insekten steuert die Tageslänge (Photoperiode) neben der Tagesaktivität den Schlüpfrythmus und ist Auslösefaktor für die Winterruhe. Bei den meisten Insekten weisen die Aktionsspektren für photoperiodische Reaktionen einen Wirkungsgipfel im Blaubereich des Lichts um 450 nm auf. Larven oder erwachsene Tiere vieler nachaktiver Insektengruppen wie Schmetterlinge (Nachtfalter), Käfer, Mücken, Fliegen, Schnaken, Schwebefliegen, Köcherfliegen, Wespen, Wanzen, Grillen etc. werden von Licht angezogen und dadurch von ihrem natürlichen Lebensraum weggelockt. Anstatt Nahrung zu suchen, sich zu paaren oder Eier zu legen, verfliegen sie ihre Energievorräte an den Lampen und können dort zu Tode kommen. Besonders attraktiv für viele Insektenarten wirkt Licht im Ultraviolettbereich. Unter den angezogenen Insekten sind immer auch bedrohte Arten. Da nicht alle Insektenarten in gleichem Masse durch Licht ange lockt werden, ist es möglich, dass es dadurch zur Artenverschiebung kommt.

Wasserflöhe wandern nur während dunklen Bedingungen in die Nähe der Wasseroberfläche, um Nahrung (Algen) aufzunehmen. Bei Seen in städtischer Umgebung, die 5–30-mal mehr Licht enthalten als Seen in ländlichen Gebieten, wandern sie weniger weit hoch. Spinnen zeigen unterschiedliches Verhalten auf Licht: Während die einen wie die Brückenkreuzspinne aktiv beleuchtete Orte aufsuchen, meiden andere das Licht. Bei Weinbergschnecken sind Aktivitätsdauer, Wachstum und Eiablage von der Lichtdauer abhängig. Bei mehr als 15 h Licht sind die Schnecken zwar aktiv, wachsen aber weniger. Lange Tage regen die Eiablage der erwachsenen Tiere an.

Fische

Das Lichtregime stellt in der Fischzucht ein wichtiger ökonomischer Faktor dar. Forellen und Lachse laichen normalerweise einmal im Jahr. Mit einem entsprechenden Lichtregime laichen sie zusätzlich 6 Monate später nochmal. Die Geschlechtsreife der Weibchen kann gehemmt oder verzögert werden, wenn sie zum richtigen Zeitpunkt Dauerlicht ausgesetzt werden.

Bestimmte Fische lassen sich von Licht anziehen (z. B. Hering, Lachs), während andere Licht meiden (z. B. Aal). Während die einen unter künstlicher Beleuchtung eine grössere Aktivität zeigen, sind andere weniger aktiv. Bestimmte Fische fressen vor allem in dunklen Nächten, nicht aber bei Vollmond oder künstlicher Beleuchtung. Nächtliche Beleuchtung kann durch den Anlockeffekt das Wanderverhalten und die Verteilung von Fischen verändern.

Amphibien und Reptilien

Amphibien sind fast ausschliesslich nachtaktiv. Bei Beleuchtung erscheinen bestimmte Amphibien eine Stunde später aus ihrem Versteck und verlieren dadurch Zeit für die Nahrungssuche. Künstliche Nachtbeleuchtung blendet Frösche und Kröten, sodass sie Schwierigkeiten haben, Beute (Insekten) zu fangen. Andererseits werden sie von Licht angezogen, sobald sich ihre Augen daran gewöhnt haben, und die Beutejagd kann sich sogar einfacher gestalten, wenn sie die Nahrung durch die Beleuchtung sehen oder das Licht eine grosse Menge an Beute angezogen hat. Allerdings besteht dadurch die Gefahr, dass sie ihrerseits zur leichten Beute werden.

Künstliche Nachtbeleuchtung gefährdet die Fortpflanzung von Froscharten, die sich nur bei sehr geringen Lichtverhältnissen paaren oder bei hellem Licht nicht rufen und sich unter diesen Umständen auch nicht paaren können.

Bei Eidechsen wird die Bewegungsaktivität, die Tätigkeit der Keimdrüsen und der Farbwechsel allein durch ein lichtempfindliches Gehirnorgan, d. h. über die Schädeldecke, gesteuert. Bei künstlicher Beleuchtung muss deshalb mit schwer wiegenden Veränderungen gerechnet werden.

Vögel

Bei Vögeln reicht – wie bei Eidechsen – die Lichtdurchlässigkeit der Schädeldecke aus, um geringe Helligkeitsunterschiede zu registrieren und den Organismus zu beeinflussen. Mit Zusatzlicht kann die Geschlechtsreife bei Hühnern vorverschoben und die Tätigkeit der Keimdrüsen (Eiablage) verlängert werden. Andererseits nimmt die Spermaproduktion beim erwachsenen Hahn markant ab, wenn die längere Beleuchtung beibehalten wird. Künstliche Beleuchtung kann auch die Nestdichte und den Brutbeginn bei Wildvögeln beeinflussen.

Bei niedriger Wolkendecke, Dunst oder Nebel wird das Licht von Agglomerationen, Gebäuden oder anderen baulichen Strukturen an den Wassertröpfchen reflektiert, was zu einem erleuchteten Areal, gewissermassen einer Lichtglocke oder einem Lichtdom, führt. Unter solchen Umständen können Tausende von nachts fliegenden Zugvögeln zu Tode kommen, da sie in niedrigerer Höhe ohne Orientierung nach den Sternen und der Fernorientierung durch Landmarken fliegen müssen und vom Licht angezogen werden. Die Vögel finden nicht mehr aus der Lichtglocke heraus und sterben an Erschöpfung oder kollidieren mit Strukturen oder anderen Vögeln, da sie immer zahlreicher werden. Sie verlieren wertvolle Energiereserven, weil sie Umwege fliegen oder einige Zeit in der Lichtsphäre gefangen sind. Diese Mechanismen sind von punktuellen Lichtquellen (z. B. Fernmeldetürmen, Wolkenkratzern), beleuchteten Arealen (z. B. Flugplätzen, Elektrizitätswerken etc.) wie auch von Lichtglocken über Agglomerationen aus vielen Ländern bekannt.

Beim Einfliegen in einen starken Lichtkegel (z. B. Skybeamer) zeigen nachts ziehende Vögel eine Schreckreaktion, indem sie von ihrer ursprünglichen Flugrichtung abweichen und ihre Fluggeschwindigkeit reduzieren.

Säugetiere

Nachtaktive Säugetiere reagieren auf grössere Lichtintensität mit einer Verlängerung des circadianen Rhythmus. Licht hat bei Säugetieren einen grossen Einfluss auf die Fortpflanzung: Bei der Tierproduktion (Pferde, Schafe, Ziegen) wird zusätzliches Licht, eventuell zusammen mit dem Hormon Melatonin, eingesetzt, um die sexuelle Aktivität auch entgegen der natürlichen Jahreszeit zu steuern sowie Spermaproduktion, Fruchtbarkeit und Jungenzahl zu erhöhen.

Künstlich beleuchtete Räume werden von bestimmten nachtaktiven Säugetieren gemieden. Fledermäuse fliegen später aus, wenn die Ausflugsöffnungen beleuchtet werden und keine alternativen Möglichkeiten bestehen. Den Tieren bleibt dadurch weniger Zeit für die Nahrungssuche. Bekannt sind Fälle, wo angestammte Quartiere nach der Installation einer neuen Beleuchtung von den Fledermäusen verlassen wurden oder wo Licht-einsatz bei einem Stadtfest zu erhöhter Jungensterblichkeit führte.

Menschen

Wie alle anderen Säugetiere reagiert auch der Mensch auf die Dunkel-Hell-Zyklen des Naturtages. Licht wird von einem Photopigment in den Zellen der Netzhaut des menschlichen Auges aufgenommen und als elektrische Impulse über Nervenbahnen zur physiologischen (inneren) Uhr im Zwischenhirn weitergeleitet. Dort wird in der Zirbeldrüse mit Höhepunkt zwischen 2 und 4 Uhr morgens in der Dunkelheit das Hormon Melatonin freigesetzt, welches den Schlaf-Wach-Rhythmus und andere zeitabhängige Rhythmen des Körpers wie beispielsweise die Produktion anderer Hormone steuert. Neben diesen Steuerfunktionen übernimmt Melatonin eine wichtige Rolle in der Immunabwehr und hat krebshemmende Wirkung.

Das Photopigment in der menschlichen Netzhaut reagiert hoch sensitiv auf Licht blauer Wellenlänge bereits bei einer Lichtstärke, die nicht einmal dem Vollmond entspricht. Wird die Dunkelheit durch künstliches Licht unterbrochen, wird die natürliche Produktion von Melatonin gestoppt. Bei Menschen, die über längere Zeit Schicht arbeiten, können entsprechend gesundheitliche Probleme auftreten wie gestörte physiologische Rhythmen (Hormonproduktion, Zellteilung), Schlafprobleme, chronische Müdigkeit, Herz-Kreislauf-Probleme, Krebserkrankungen.

2 EINFÜHRUNG

Kunstlicht in Aussenräumen ist zu einem wichtigen Bestandteil unserer Kultur geworden. Licht wird heute jedoch im Übermass verbraucht und strahlt auch in Räume aus, wo es nicht nötig ist. Es kann ökologisch und landschaftlich lästige oder schädliche Auswirkungen haben.

Lichtimmissionen nehmen seit Jahren weltweit exponentiell zu. Mehr Licht wird eingesetzt, um dem Sicherheitsbedürfnis zu genügen, Strassen und Plätze sind die ganze Nacht beleuchtet. Bauwerke und andere Objekte werden angestrahlt und ausgeleuchtet, künstlerische Installationen geben neue Aspekte in der Stadtlandschaft. Jede künstliche Lichtquelle kann zu unerwünschten Lichtimmissionen beitragen. Die Lichtimmissionen sind eine einschneidende Veränderung unserer natürlichen Umgebung und können negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben.

Diese Zusammenstellung zeigt die ökologischen Auswirkungen künstlicher Beleuchtung auf Pflanzen, Tiere und Menschen auf. Sie beschränkt sich also auf den biologischen und medizinischen Aspekt. Energetische, technische, astronomische, ästhetische und psychologische Gesichtspunkte sind nicht einbezogen (siehe dazu zum Beispiel Zumthor et al. 2006). Die ökologischen Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung wurden aufgrund einer umfassenden Literaturrecherche abgeklärt und bewertet. Die anschließenden grundsätzlichen Empfehlungen sollen Denkanstösse geben und aufzeigen, mit welchen Massnahmen unerwünschte Lichtimmissionen vermieden werden können.

Lichtverschmutzung – Lichtimmission

Bei der Diskussion um die Auswirkung künstlichen Lichts auf die Umwelt wird meistens der Begriff «Lichtverschmutzung» verwendet, der aus der wörtlichen Übersetzung des englischen «Light pollution» stammt. Es ist jedoch nicht das Licht verschmutzt, sondern das Licht wird im Übermass verbraucht und ist zunehmend als Störgrösse in der Umwelt und im Naturhaushalt wirksam. Seltener wird auch «Lichtsmog» verwendet. Im vorliegenden Bericht wird der Vorschlag von Klaus (2005) aufgenommen und von «Lichtimmission» und «Lichtemission» gesprochen, die Definition jedoch von Kobler (2003) beibehalten, welche lautet:

«Lichtemission ist die in Richtung, Quantität und Qualität emittierte Strahlung innerhalb des Infrarot-, des sichtbaren Lichts und des UV-Lichts in Aussenräumen, die auf den Raum neben, unter und über uns ökologisch und landschaftlich lästige oder schädliche Auswirkungen haben könnte.»

3 METHODEN

Verwendete Literatur und Grundlagen

Für die Zusammenstellungen über Auswirkungen von Licht allgemein und künstlichem Nachtlicht sowie deren Beurteilung und die daraus abgeleiteten Empfehlungen dienten qualitativ unterschiedliche Unterlagen. Um den vorliegenden Bericht transparent zu machen, werden die verwendeten Grundlagen im Folgenden kurz vorgestellt.

Übersichtsdarstellungen

Für die Zusammenstellung über lichtinduzierte Vorgänge bei Pflanzen sowie über allgemein endogene Rhythmen und Photoperiodismus wurden das Buch von Larcher (1984) sowie die Photobiologievorlesung von Häder (2004) konsultiert. Bei der Zusammenfassung der Auswirkung des Lichts auf den Menschen wurde eine Review von Pauley (2004) als Grundlage verwendet.

Spezifische Untersuchungen

Die Auswirkung von künstlichem Nachtlicht auf Tiere wurde hauptsächlich aufgrund von ausführlichen Abstracts wissenschaftlicher Untersuchungen oder Konferenzen zusammengefasst, die von The Urban Wildlands Group aus Kalifornien im Internet zur Verfügung gestellt wurden (Rich & Longcore 2002, The Urban Wildlands Group 2002). Das Buch *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* dieser Gruppe wird im Jahr 2006 herausgegeben (Rich & Longcore 2006). Beim Vorhandensein eines Abstracts wurde jeweils der Autor des Grundlagenpapers zitiert. Konferenzabstracts sind in der Literaturliste speziell angegeben und die entsprechende Homepage ist zusätzlich angeführt. Spezifische Untersuchungen, die verallgemeinernde Aussagen veranschaulichen sollen, sind im Text mit Bsp. herausgehoben.

Einzelereignisse, Zitate von Personen

Einzelereignisse finden nicht in der wissenschaftlichen Literatur Eingang. Es sind Zeitungsmeldungen, die oft Genauigkeit vermissen und sich kaum nachprüfen lassen. Ihr Wahrheitsgehalt ist entsprechend vorsichtig zu bewerten. Ebenso wenn Personen aus dem Wissenschaftsbereich von Zeitungen zitiert werden. Trotzdem wurden Einzelereignisse und Zitate angeführt, da sie das Bild abrunden oder weil es kaum möglich ist, solchen eventuell wichtigen Tatsachen nachzugehen. In der Literaturliste wurde bei diesen Unterlagen immer auch die Homepage angegeben. Einzelereignisse sind im Text mit Bsp. herausgehoben.

Beurteilungen, Empfehlungen

Bei der ökologischen Beurteilung und den Empfehlungen wurden einerseits die spezifischen wissenschaftlichen Untersuchungen über die Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht einbezogen. Andererseits waren Zusammenstellungen über den Einsatz ökologisch verträglicher Beleuchtung und Empfehlungen von Klaus (2005), Kobler (2003), Schanowski (2000) und Piller (2004) eine Hilfe.

4 AUSWIRKUNGEN VON LICHT AUF PFLANZEN, TIERE UND MENSCHEN

Allgemeine Grundlagen

Die unten stehende Zusammenfassung bezieht sich auf die internationale Literatur bis zum Februar 2006 und zeigt die allgemeinen Mechanismen zwischen Licht und innerer Uhr auf. Sie stützt sich auf Häder (2004).

Naturtag synchronisiert circadiane Rhythmik

Alle Organismen, d. h. Bakterien und andere Prokaryonten, Algen, Pilze, Pflanzen, Tiere und natürlich auch die Menschen verfügen über eine ausgeprägte innere Uhr. Endogene Rhythmen erfolgen ohne äussere Reize, sondern werden durch die innere Uhr gesteuert, können aber durch externe Zeitgeber synchronisiert werden. Die Zeit zwischen zwei Maxima eines rhythmischen Vorgangs, die so genannte Periode, beträgt beim natürlichen Tag-Nacht-Wechsel 24 h, kann aber auch kürzer oder länger sein, weshalb von circadianer Rhythmik gesprochen wird.

Die Periodenlänge «freilaufender» (nicht synchronisierter) endogener Rhythmen ist signifikant von 24 h verschieden. Sie ist genetisch determiniert und kann je nach Organismus zwischen 15 h und 30 h betragen. Im Naturtag werden diese Rhythmen jedoch alle auf eine Periodenlänge von 24 h synchronisiert. Licht-Dunkel-Wechsel mit Periodenlängen kürzer als 21 h oder länger als 27 h werden meistens nicht mehr nachvollzogen.

Lichtintensitätsänderungen bestimmen endogene Rhythmik

Im natürlichen Tagesablauf kommen sowohl Temperatur- als auch Lichtintensitätsänderungen vor. Experimente mit gegeneinander phasenverschobenen Temperatur- und Licht-Dunkel-Wechseln zeigen, dass die meisten Pflanzen und viele Tiere vorwiegend den Licht-Dunkel-Wechsel beantworten und die endogene Rhythmik recht schnell daran anpassen, den Temperaturwechsel hingegen ignorieren.

Der wichtigste Faktor für die Synchronisation eines Systems im Naturtag scheinen die Helligkeitsunterschiede bei Sonnenaufgang und -untergang zu sein. Experimentell erzeugte Helligkeitsunterschiede von 1 Lux wirken in einigen Fällen bereits synchronisierend. Helligkeitsunterschiede zwischen 1 und 10 Lux treten etwa eine halbe Stunde vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang auf (vgl. Tab. 1).

Licht beeinflusst Periodenlänge von Tagesrhythmus

Auch die Periodenlänge des Tagesrhythmus ist von der Lichtintensität abhängig. Werden Organismen bei Dauerlicht (24 h) unterschiedlichen konstanten Lichtintensitäten ausgesetzt, so reagieren vor allem nachtaktive Tiere wie Mäuse bei steigender Helligkeit mit einer Zunahme der Periodenlänge, während bei tagaktiven Tieren wie Vögeln die Periodenlänge abnimmt.

Bei Tieren sind Licht blauer und roter Wellenlänge sowie Infrarotstrahlung bei der Auslösung endogener Rhythmen wirksam (vgl. Tab. 2). Die Lichtperzeption erfolgt meistens durch die Sehpigmente, jedoch liess sich bei Arthropoden und Vertebraten (z. B. Vögeln) auch eine Lichtabsorption durch das Gehirn oder Teile des Gehirns mit extraretinalen Rezeptoren nachweisen.

Gen für die innere Uhr

In jüngster Zeit hat man das Gen für die innere Uhr sowohl bei Pflanzen (*Arabidopsis*) als auch bei Tieren (*Drosophila*) gefunden. Die Hypothese nimmt an, dass die Genexpression lichtabhängig ist und dass das Genprodukt im Laufe von ca. 24 h wieder abgebaut wird. Ein ähnlicher Mechanismus wird für Menschen (und Tiere und neuerdings sogar für Algen) diskutiert: Beim Menschen wird in der Nachtphase Melatonin von der Zirbeldrüse (*Epiphyse*) abgegeben. Tagsüber wird das Melatonin im Licht abgebaut (vgl. Kapitel *Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Tiere und den Menschen*, S. 25).

Ökologischer Vorteil des Photoperiodismus

Die Steuerung durch die Tageslänge ermöglicht eine Reihe ökologischer Vorteile. Neben der Synchronisation bestimmter täglicher Funktionsabläufe ist auch die Synchronisation reproduktiver Phasen für Tiere und Pflanzen wichtig. Es ist beispielsweise für Tiere von Vorteil, ihre Jungen bei günstigen Umweltbedingungen aufzuziehen, und für Pflanzen, nicht im Winter zu blühen. Die meisten Tiere und Pflanzen sind offenbar in der Lage, ihre innere Uhr an die sich ändernden Umweltbedingungen, insbesondere an die sich ändernden Tageslängen innerhalb des Jahres anzupassen. Voraussetzung ist, die Tages- bzw. Nachtlängen zu messen und das «Messergebnis» in eine steuernde Funktion umzusetzen. Die Regulation von Keimung, Wachstums- und Entwicklungsprozessen sowie Alterungs- und Ruhephasen der Pflanzen wird durch die Photoperiode, die Tageslänge, bestimmt. Am bekanntesten ist die photoperiodische Regulation der Blütenbildung.

Im gesamten Tierreich findet man eine Fülle vonlichtsynchronisierten, rhythmischen Wachstums-, Entwicklungs- und Reproduktionsvorgängen. Bei den meisten Wirbeltieren, die ausserhalb der Tropen leben, wird der Reproduktionszyklus durch die Photoperiode reguliert. Die Wirkungsmechanismen und die Kausalketten für die Auslösung und Aufrechterhaltung photoperiodischer Reaktionen sind bisher weder im Tierreich noch im Pflanzenreich hinreichend aufgeklärt.

Auswirkungen der Lichtqualität

Die Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht sind abhängig von der Lichtqualität wie der Helligkeit und der Wellenlänge des ausgestrahlten Lichts. Das Hauptgewicht im folgenden Unterkapitel liegt auf den Auswirkungen des Lichtspektrums von Beleuchtungen, da bereits Licht von geringer Helligkeit auf Organismen einwirken kann (vgl. unten).

Beleuchtungsstärke und ihre Auswirkungen

In der folgenden Tabelle sind einige Beleuchtungsstärken von Natur- und Kunstlicht und deren Auswirkungen zusammengetragen.

Tab. 1 Beleuchtungsstärke und Auswirkung: Die Beleuchtungsstärke gibt an, wie viel Lichtstrom auf eine Flächeneinheit fällt. Sie wird in Lux (lx) gemessen.

Lux	Beispiel/Auswirkung
0.001	Sternklarer Nachthimmel
0.1/0.25	Beleuchtung durch Vollmond (Pauley 2004/Wikipedia). Der Melatoninspiegel des Menschen wird am stärksten reduziert, wenn die Probanden bei offenen Augen für 90 Minuten zwischen 2 und 3 Uhr 30 morgens mit monochromatischem blauem Licht der Wellenlänge 464 nm und einer Helligkeit von nur 0.1 lx ausgesetzt wurden (Pauley 2004). 0.1 lx reichen aus, um die vertikale Verteilung von aquatischen Invertebraten zu beeinflussen (Moore et al. 2000).
0.2	Weisses Dämmerlicht von nur 0.2 lx reichen aus, um Melatonin bei Ratten zu unterdrücken, was zeigt, wie hochsensibel bei diesen Tieren das circadiane System ist, das durch Licht auf der Netzhaut in Gang gesetzt wird (Pauley 2004).
0.5	Bei der Zuckmücke <i>Clunio marinus</i> lassen sich durch schwache Beleuchtung mit 0.5 lx experimentell rhythmische Schlüpfaktivitäten auslösen (Häder 2004).
1	Helligkeitsunterschiede von 1 lx wirken in einigen Fällen bei Organismen bereits synchronisierend (auf 24-h-Rhythmus des Naturtages) (Häder 2004).
1 – 10	Helligkeitsunterschiede zwischen 1 und 10 lx treten etwa eine halbe Stunde vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang auf (Häder 2004).
10	Strassenbeleuchtung (Wikipedia). Bei Vögeln reicht die Lichtdurchlässigkeit der Schädeldecke aus, um im Gehirnbereich, ermutlich in der Epiphyse, Helligkeitsunterschiede von 10 lx zu registrieren (Häder 2004).
300	Schulzimmerbeleuchtung von Tagesschule. Das Wachstum der Lebertumorzellen bei Rattenversuchen war ähnlich bei weissem Licht von der Helligkeit 300 lx wie bei 0.2 lx (Pauley 2004). Bei Ratten, die im Dauerlicht bei 300 lx gehalten wurden, nahmen die Krebszellen mehr Fettsäure (<i>Linoleic acid</i>) auf und wuchsen schneller als bei Ratten in normaler Licht-Dunkel-Umgebung (Pauley 2004).
500	Bürobeleuchtung, Beleuchtung Arbeitsstätte im Innenraum SN EN 12464.
20 000	Bedeckter Sommertag (Wikipedia).
100 000	Heller Sommertag (Wikipedia).

Hell-Dunkel-Adaptation des menschlichen Auges

Das menschliche Sehsystem passt sich relativ langsam an Hell-Dunkel-Wechsel an. Nach dem Übergang aus dem Hellen ins Dunkle wird die grösste Empfindlichkeit des Auges erst nach einem Dunkelaufenthalt von über 30 Minuten erreicht (Dunkeladaptation). Der zur Dunkeladaptation entgegengesetzte Prozess ist die Helladaptation, der beispielsweise eintritt, wenn man nach einem längeren Aufenthalt im Dunkeln einen hell erleuchteten Raum betritt. Ist die Leuchtdichtedifferenz sehr gross, kommt es zu einem vorübergehenden Blendungseffekt. Danach passt sich das Sehsystem innerhalb von 15 bis 60 Sekunden an die neue Umwelteleuchtdichte an. Blendung geht mit einer Herabsetzung der Empfindlichkeit und einer Störung der Formwahrnehmung einher und kann z. B. durch starkes Gegenlicht im nächtlichen Strassenverkehr ausgelöst werden (Schmidt 1980).

Reaktionen von Insekten auf UV-Licht und Licht blauer Wellenlänge (bis ca. 490 nm)

Bei den meisten Insekten weisen die Aktionsspektren für photoperiodische Reaktionen einen Wirkungsgipfel im Blaubereich um 450 nm auf (Häder 2004).

Die Anziehung durch künstliches Licht ist von vielen nachtaktiven Insektengruppen bekannt (vgl. Kapitel Invertebraten [*Wirbellose*], S. 25). Dabei scheint alle künstliche Beleuchtung in einem gewissen Mass Insekten anzuziehen (Eisenbeis & Hassel 2000, Scheibe 2000). Die Anziehungskraft hängt jedoch stark vom Lichtspektrum ab. Besonders attraktiv für viele Insekten wirkt offenbar Licht im Ultraviolettbereich (vgl. Tab. 2), was sich Insektensammler zu Nutze machen. Untersuchungen über die Anlockwirkungen von Lampen, die Licht auf unterschiedlichem Spektrum ausstrahlen, ergeben jedoch kein einheitliches Bild (vgl. Tab. 3): Der Anteil von UV-Licht von Lampen scheint für die Anlockwirkung auf Wasserinsekten nicht bestimmend zu sein. Bsp.: Insektenfänge von fliegenden Wasserinsekten an einem Bach mit zwei Lampentypen unterschiedlicher UV-Emission (hoher UV-Anteil – geringer UV-Anteil) ergaben keine unterschiedliche Fängigkeit (Scheibe 1999).

Durch das weisse Licht, d. h. Licht des gesamten sichtbaren Spektrums von Quecksilberdampflampen HME werden im Allgemeinen mehr Insekten angelockt als durch das gelborange Licht im Wellenbereich von 570 – 630 nm von Natriumdampf-Lampen HSE (Blake et al. 1994, Frank 1988, Rydell & Baagøe 1996, Kolligs 2000, Scheibe 2000). Bsp.: Beim gelborangen Licht war die Anzahl der Insekten mehr als 50 % niedriger und im Fall von Faltern sogar um 75 % reduziert (Eisenbeis & Hassel 2000; vgl. Kapitel *Umweltverträglichkeit verschiedener Lampentypen ...*, S. 57). Das weisse Licht von Quecksilberdampflampen scheint zudem für ein grösseres Spektrum von Insektenarten attraktiv zu sein (Kolligs 2000). Bsp.: Andererseits lassen sich bestimmte Insektenarten kaum vom weissen Licht der Quecksilberlampen anlocken (z. B. Eintagsfliegen *Ephemeroptera* und Steinfliegen *Plecoptera*) und Weibchen und Männchen einer Art können in unterschiedlichem Mass darauf reagieren (Scheibe 2000). Bsp.: Bei Strassenbeleuchtung mit verschiedenen Lampenarten, die in 30 m Entfernung voneinander stehen, findet Licht-

konkurrenz und Abwanderung der Insekten zur Lampe mit «attraktiverem» Spektrum statt, also beispielsweise von der Natrium- zur Quecksilberdampf- (Scheibe 2000).

Bsp.: Das weisse Licht von Quecksilberdampf-Strassenlampen interferiert offenbar auch mit der normalen Fähigkeit des Tympanalorgans bestimmter Motten, die Ultraschallrufe von Fledermäusen wahrzunehmen und diesen Feinden zu entgehen (Svensson & Rydell 1998).

Tab. 2 Spektralfarben: Das für Menschen sichtbare Licht erstreckt sich von 380 bis 780 nm. Die Übergänge zwischen Farben sind fließend. UV- und IR-Licht sind für uns nicht sichtbar, wurden jedoch in der Tabelle ergänzt (grau hinterlegt), da Organismen auch Reaktionen auf Licht dieser Wellenlängen zeigen (Tabelle aus Wikipedia).

Farbton	Wellenlänge 1 nm = 10 ⁻⁹ m	Wellenfrequenz 1 THz = 10 ¹² Hz = 1012 Schwingungen/ sec	Energie pro Photon eV = Elektronenvolt (Energie, die Elektron aufnimmt, wenn es das Spannungsgefälle von 1 V durchläuft)
(UV-Strahlung)	10 – 380 nm		
Violett	380 – 420 nm	789 – 714 THz	3.26 – 2.95 eV
Blau	420 – 490 nm	714 – 612 THz	2.95 – 2.53 eV
Grün	490 – 575 nm	612 – 522 THz	2.53 – 2.16 eV
Gelb	575 – 585 nm	522 – 513 THz	2.16 – 2.12 eV
Orange	585 – 650 nm	513 – 462 THz	2.12 – 1.91 eV
Rot	650 – 750 nm	462 – 400 THz	1.91 – 1.65 eV
(IR-Strahlung)	750 – 1000 nm		

Reaktion von Tieren auf Licht im grünen bis roten Wellenbereich

Insektenarten reagieren artspezifisch auf Licht verschiedener Wellenlänge (vgl. oben). Bsp.: Es gibt beispielsweise Nachtfalterarten, die unter gelborangem Licht von Natriumlampen häufiger zu beobachten sind, im Gegensatz zum allgemeinen Verhalten dieser Insektengruppe (Eisenbeis & Hassel 2000).

Bsp.: Bei Wasserinsekten zeigten Versuche mit verschiedenen Lichtspektren, dass das gelbe Licht der Natrium-Wellenlinie vom Intensitätsmaximum bei 579 nm die grösste Attraktivität hatte (z. B. Zuckmücken *Chironomidae*), dann folgte das blaue Licht auf 437 nm und zuletzt das orangefarbene Licht mit Intensitätsmaximum bei 599 nm (Scheibe 2000; vgl. Tab. 3).

Bsp.: Weibliche Glühwürmchen *Lampyridae* (Leuchtkäfer) geben zur Anziehung von Männchen durch Biolumineszenz Signale ab. Die spektrale Zusammensetzung liegt etwa zwischen 500 bis 650 nm (im grünen und gelben Wellenbereich) mit Maximum bei 550 bis 580 nm (vgl. Tab. 2 und 3). Die *Lampyrus*-Männchen sprechen auf Gelb maximal an (Schwalb 1961).

Von der spektralen Zusammensetzung des Lichts beeinflusst wird auch die Orientierung von nachtaktiven Salamandern und von Zugvögeln. Bsp.: Licht von oranger Wellenlänge kann die Wanderungen von Salamandern von den terrestrischen Lebensräumen zu den Laichplätzen und zurück unterbinden (Wise & Buchanan 2002). Bsp.: Licht von gelber und roter Wellenlänge beeinflusst die Wahrnehmung des Magnetfeldes, welches die Zugvögel als wichtigste Orientierungshilfe auf ihrem Zug benutzen (Gauthreaux & Belser in Rich & Longcore 2006).

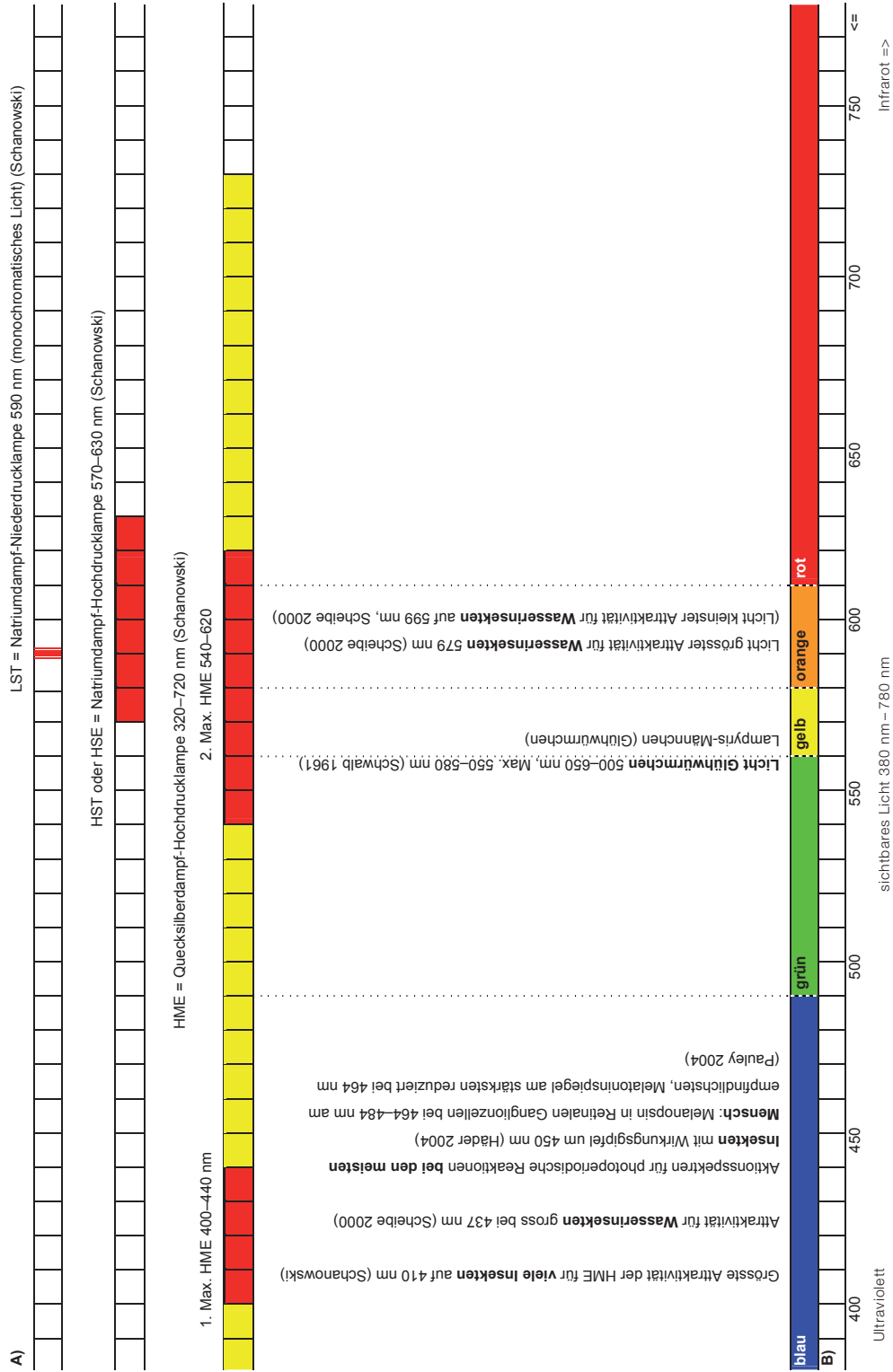
Indirekter Effekt von unterschiedlichem Licht auf Fledermäuse

Beleuchtete Strassen werden von bestimmten Fledermäusen (*Nyctalus*, *Eptesicus*, *Pipistrellus*) zur Insektenjagd aufgesucht (Blake et al. 1994, Rydell & Baagøe 1996, Haffner & Stutz 1986). Bsp.: Bei Strassen mit Lampentypen, die Quecksilberdampf oder eine Mischung von Natrium- und Quecksilberdampf ausstrahlten, wurde neben der grösseren Insektenzahl auch eine grössere Konzentration von Fledermäusen beobachtet (Blake et al. 1994, Rydell & Baagøe 1996). Bei Strassen, die mit monochromatischem orangefarbenem Licht (590 nm) der Natriumlampen bestückt waren, wurden im Vergleich zu unbeleuchteten Strassen nicht mehr Fledermäuse und Insekten beobachtet (vgl. Kapitel *Lichtbeeinflusste Beuteansammlung zieht Feinde an*, S. 40).

Licht blauer Wellenlänge und Melatonin beim Menschen

Beim Menschen liegt die grösste Empfindlichkeit der Photorezeptoren, welche die circadiane Uhr und damit vielfältige Körperfunktionen regulieren, bei blauem Licht zwischen 464 und 484 nm (vgl. Kapitel *Blaues Licht in der Nacht und Melatonin-Produktion*, S. 37). Bsp.: Menschen, die 6.5 h blauem Licht der Wellenlänge 460 nm ausgesetzt waren, zeigten eine zweimal grössere Verzögerung der circadianen Phase als bei 555 nm (grünes Licht, vgl. Tab. 2) und das Melatonin war zweimal so stark unterdrückt (Pauley 2004). Bsp.: Bei der Beleuchtung mit monochromatischem rotem Licht der Beleuchtungsstärke 100 lx (Zimmerbeleuchtung) war die Melatonin-Produktion nach 403 h um 50 % unterdrückt, bei einer Kerze nach 66 min, bei einer 60 W Glühbirne nach 39 min, bei 58 W Delux Tageslicht-Fluoreszenzlicht nach 15 min und bei einer reinen Weisslicht-Lampe LED nach 13 min (Pauley 2004).

Tab 3 A) Lichtintensität von Lampentypen (gelb = mässige, rot = höchste Intensität) und B) Empfindlichkeit von Tieren auf Lichtspektrum



Grundlagenbericht Lichtmission, 13. März 2007, SWILD Zür

Effekte von Licht auf Pflanzen

Diese allgemeine Zusammenfassung über die Bedeutung des Lichts für Pflanzen stützt sich, wenn nichts anderes vermerkt ist, auf Larcher (1984) und Häder (2004). Die unten dargestellten lichtinduzierten Vorgänge beziehen sich auf Licht allgemein und auf das Tageslicht. Viele Einsichten darüber wurden jedoch durch experimentelle Forschung mit künstlichem Licht gewonnen.

Allgemeine Bedeutung von Tageslicht für Pflanzen

Strahlung (Licht) ist für die Pflanze Energiequelle, entwicklungssteuernder Reiz und zuweilen ein Belastungsfaktor. Da nur absorbierte Strahlungsquanten photochemisch aktiv sein können, wird jeder strahlungsabhängige Vorgang durch ganz bestimmte Photorezeptoren vermittelt. Durch Aufnahme von Strahlungsquanten werden Rezeptorsubstanzen chemisch verändert, die in der Folge Stoffwechsel, Wachstums- und Entwicklungsvorgänge wie Samenkeimung, Stängelwachstum, Blattausdehnung, Übergang vom vegetativen in den Blühstatus, Blütenentwicklung, Fruchtentwicklung und Alterung steuern und chemische Umsetzungen verursachen (Briggs 2002, Davis 2003). Dabei können energiereiche Moleküle aufgebaut, molekulare Strukturen verändert oder Reaktionen beschleunigt werden. Strahlung beeinflusst die Gestaltausprägung im subzellulären, im zellulären und gesamtorganisatorischen Bereich und synchronisiert den Entwicklungsablauf und die Vegetationsrhythmik mit dem Wechsel der Tages- und Jahreszeiten (Stellen der inneren Uhr).

Pflanzen passen sich mit ihrem Stoffwechsel, in ihrer Entwicklung und in ihrer Ausgestaltung an die vorherrschende Quantität und Qualität des Strahlungsangebotes auf ihrem Wuchsplatz an:

- modulativ, d. h. rasch und vorübergehend, beispielsweise bei Blattbewegung,
- modifikativ, d. h. an die durchschnittlichen Strahlungsbedingungen während des Heranwachsens, wobei die Ausprägungsform beibehalten wird,
- evolutiv: diese Anpassungen an das Strahlungsangebot sind genotypisch verankert und bedingen die oft auffälligen Unterschiede in der Verbreitungsökologie verschiedener Pflanzenarten und Ökotypen.

Tageszeitlicher Rhythmus im Naturtag

Der tageszeitliche Hell-Dunkel-Wechsel beeinflusst das Verhalten der Pflanzen: Die Atmungsaktivität, die Permeabilitätseigenschaften des Protoplasmas, der zelluläre und der organismische Stofftransport lassen eine tageszeitliche (diurnale) Rhythmik erkennen, Wachstumsvorgänge werden durch den tageszeitlichen Photoperiodismus induziert oder gesteuert (z. B. Blatt- und Blütenbewegungen). Im künstlichen Dauerlicht (24 h) erlahmt das Photosynthesevermögen bei manchen Arten.

Tageslänge löst Blütenbildung aus

Bei vielen Pflanzen wird die Blütenbildung bei einer bestimmten kritischen Tageslänge ausgelöst. Es lassen sich prinzipiell drei Typen mit unterschiedlichem Tageslängenbedürfnis unterscheiden:

- Kurztag-Pflanzen KTP (z. B. Roter Gänsefuß *Chenopodium rubrum*, Kalanchoe *Kalanchoe blossfeldiana*) blühen, wenn eine bestimmte, artspezifische, kritische Tageslänge unterschritten wird (z. B. <12 h). Oberhalb dieser kritischen Tageslänge bleiben die Pflanzen vegetativ. Bsp.: Bei der KTP *Kalanchoe blossfeldiana* verhindert hellrotes Störlicht von einer Stunde in der Mitte der Dunkelphase die Blütenbildung. Die Pflanzen bleiben vegetativ, obwohl der Kurztag vorausgegangen ist.
- Langtag-Pflanzen LTP (z. B. Rettich *Raphanus sativus*, Spinat *Spinacia oleracea*) blühen, wenn eine bestimmte, artspezifische, kritische Tageslänge überschritten wird (z. B. >12 h). Beim Unterschreiten der kritischen Tageslänge bleiben sie vegetativ. LTP, die im Kurztag vegetativ bleiben würden, werden durch einstündiges Störlicht in der Mitte der Dunkelperiode zur optimalen Blütenbildung angeregt.
- Bei tagneutralen Pflanzen (z. B. bei Bohne *Phaseolus vulgaris*, Mais *Zea mays*) erfolgt die Blühinduktion unabhängig von der Tageslänge.

Neben der Tageslänge spielt die Temperatur bei der Blühinduktion eine entscheidende Rolle. Im Extremfall können Pflanzen wie z. B. Wolfsmilch *Euphorbia* (KTP) bei niedrigen Temperaturen im Langtag, bei hohen im Kurztag blühen.

Anpassung an die Tageslänge der geografischen Breite

Die Tageslänge schwankt in Abhängigkeit von der geografischen Breite. Diesen unterschiedlichen Tageslängen haben sich viele Pflanzenarten in ihrem photoperiodischen Blühverhalten im Laufe der Evolution angepasst. So gibt es am Äquator überwiegend KTP, während in geografischen Breiten oberhalb von 60° Nord oder Süd überwiegend LTP zu finden sind. Einige Kulturvarietäten der Sojabohne sind sogar so stark auf eine bestimmte Tageslänge fixiert, dass sie nur innerhalb einer Zone von ca. 80 km Breite optimal wachsen.

Reaktion auf Lichtspektrum

Pflanzen können sich an die spektrale Zusammensetzung des Lichts anpassen, indem sie ihre Farbstoffe in den Zellen verändern, was pflanzenbaulich, etwa bei der Anzucht unter Kunstlichtbedingungen, von grossem Vorteil sein kann.

Aktionsspektren, die bei Versuchen für die Störlichtempfindlichkeit während der Dunkelperiode aufgenommen wurden, zeigen, dass sowohl die Blühverhinderung bei den KTP als auch die Blühinduktion bei den LTP dieselben Wirkungsgipfel im orangefarbenen und blauen Wellenlängenbereich (620 nm, bzw. 480 nm) aufweisen, wobei oranges Licht weitaus wirksamer ist als blaues Licht. Die Wirkung des orangen Störlichtes ist allerdings bei KTP und LTP entgegengesetzt.

Photorezeptoren reagieren auf Umgebungslicht

Um Licht wahrzunehmen, besitzen Pflanzen Photorezeptoren für Licht sowohl roter und blauer als auch für ultravioletter Wellenlänge (vgl. Tab. 2). Bsp.: Bei der Modellpflanze Acker-Schmalwand *Arabidopsis thaliana* sind neun verschiedene Photorezeptoren gefunden worden. Zu den bekanntesten zählen die Phytochrome (Pflanzenfarbstoffe). Sie reagieren teils unabhängig, teils in Reaktion und Kombination gegen-, auf- und miteinander in gleichen oder unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Pflanze äusserst sensibel auf vier Parameter des Umgebungslichts: auf Qualität des Lichtspektrums, auf Lichtintensität, Lichtrichtung und Lichtdauer (Davis 2003, Briggs in Rich & Longcore 2006).

Auswirkung von künstlicher Nachtbeleuchtung noch unerforscht

Bis heute wurden unzählige Untersuchungen und Experimente ausgeführt, welche die Mechanismen sowie Wechselwirkungen von Lichtwahrnehmungen und Tagesrhythmen bei Pflanzen zum Thema haben. Genauere Untersuchungen über die Auswirkung der längeren Photoperiode durch künstliche Nachtbeleuchtung auf Pflanzen in natürlicher Umgebung fehlen jedoch gänzlich. Berichtet wird von Bäumen unter Strassenlampen, die ihre Blätter beim herbstlichen Laubfall länger tragen (Briggs 2002).

Effekte von Licht auf Tiere

In diesem Kapitel werden Effekte von Licht allgemein (Tageslicht und Mondlicht im Naturtag) auf Tiere dargestellt, die für eventuelle Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung in der Nacht entscheidend sein könnten.

Artspezifische Phototaxis

Viele Tierarten bewegen sich auf das Licht zu (positive Phototaxis) oder vom Licht weg (negative Phototaxis). Positiv phototaktisch sind die Larven oder Imagos vieler nachtaktiver Insektengruppen: Schmetterlinge (Nachtfalter), Käfer, Mücken, Fliegen, Schnaken, Schwebefliegen, Köcherfliegen, Wespen, Wanzen, Grillen etc. (Frank 1988, Eisenbeis & Hassel 2000, Kolligs 2000, Summers 1997 u.a.). Negativ phototaktisch unter den Insekten sind beispielsweise die Larven von Leuchtkäferchen, welche nur Licht roter Wellenlänge gegenüber indifferent reagieren (Schwalb 1961). Phototaxis ist artspezifisch: Eine experimentelle Untersuchung innerhalb der Ordnung der Froschlurche (Frösche, Kröten, Unken) ergab beispielsweise, dass von 121 Arten 87 % durch Licht angelockt werden, also positiv phototaktisch sind (Jaeger & Hailman 1973).

Photoperiodische Effekte auf Insekten

Bei Insekten, beispielsweise bei *Drosophila melanogaster*, steuert die Photoperiode, d. h. die Tageslänge, die Schlüpfrythmen (Häder 2004). Bsp.: Durch die Tageslänge reguliert sind auch die Frühjahrs- und Sommerformen des Landkärtchens *Araschnia levana*. Frühjahrsformen mit heller Flügelzeichnung entwickeln sich aus Raupen unter Kurztagbedingungen (weniger als 14 h), Sommerformen mit dunklen Flügeln hingegen im Langtag von mehr als 16 h Dauer (Häder 2004). Bsp.: Bei den Zwergzikaden gibt es Saisonformen, die nicht nur durch ihre Färbung, sondern auch im Bau der Fortpflanzungsorgane verschieden sind (Häder 2004). Bei Insekten findet man wie bei einigen Pflanzen auch Anpassungen an die geografisch bedingte Tageslänge. Bsp.: Die nördlichsten Stämme *Drosophila littoralis* aus Nordfinnland haben mit 19 h eine weitaus längere kritische Tageslänge für die Auslösung der Diapause (Winterruhe) als Stämme aus dem Kaukasus mit 12 h kritischer Tageslänge (Häder 2004).

Mondlicht steuert Entwicklungszyklen von Zuckmücken

Ausser den durch Tageslicht gesteuerten Rhythmen gibt es im Tierreich auch Entwicklungsabläufe, die durch Mondlicht reguliert werden, wie die Brutzyklen verschiedener Insekten. Bsp.: Bei der Zuckmücke *Clunio marinus* lassen sich durch schwache Beleuchtung mit 0.5 lx (vgl. Tab. 1) experimentell rhythmische Schlüpfaktivitäten auslösen (Häder 2004).

Lichtabhängige Vertikalwanderung des Zooplanktons

Das Zooplankton in Seen bewegt sich im 24-h-Rhythmus in der Wassersäule auf und nieder, was auch als tägliche Vertikalwanderung bezeichnet wird. Vermutlich zur Feindvermeidung steigt ein grosser Teil des Zooplanktons nur während dunklen Bedingungen in die Nähe der Wasseroberfläche, um Nahrung (Algen) aufzunehmen. Halbdämmerung wie Halbmond (< 10 – 1 lx, vgl. Tab. 1) reicht aus, um die vertikale Verteilung dieser aquatischen Invertebraten zu beeinflussen. Das Muster der Vertikalwanderung ändert sich denn auch mit dem Mondzyklus (Moore et al. 2000).

Photoperiodische Effekte auf Schnecken

Die Lichtdauer kann die Aktivität von Schnecken bestimmen. Bsp. Die Photoperiode hat einen signifikanten Effekt auf die Intensität von zwei Aktivitätsparametern der Gefleckten Weinbergschnecke *Helix aspersa* Müller: auf das Wachstum der jungen und die Reproduktion der adulten Schnecken (Aupinel & Bonnet 1996). Das grösste Wachstum findet bei einer Lichtdauer von 15 Stunden statt. Bei weniger langer Dauer fressen die Schnecken nicht mehr, bei einer längeren Dauer sind die Schnecken zwar aktiv, wachsen aber weniger. Lange Tage stimulieren die Eiablage der erwachsenen Tiere im Gegensatz zu kurzen Tagen.

Lichtempfindliches Hirnorgan bei Echsen

Bsp. Bei Eidechsen konnte gezeigt werden, dass die lokomotorische Aktivität, die Keimdrüsentätigkeit und der Farbwechsel allein durch das lichtempfindliche Pinealorgan (Epiphyse im Gehirn) gesteuert werden (Häder 2004).

Lichtdurchlässige Schädeldecke bei Vögeln

Bei Vögeln reicht die Lichtdurchlässigkeit der Schädeldecke aus, um im Gehirnbereich, vermutlich in der Epiphyse, Helligkeitsunterschiede von 10 lx zu registrieren (vgl. Tab. 1). Bei Dauerlicht reagieren tagaktive Vögel auf die Lichtintensität: Bei grösserer Helligkeit nimmt die Periodenlänge ab, d. h. der normale circadiane Rhythmus wird kürzer (Häder 2004).

Lichteinfluss auf Melatonin-Produktion bei Säugetieren

Der Einfluss von Licht auf die Melatonin-Produktion und das circadiane System bei Säugetieren wird im nachfolgenden Kapitel in den Unterkapiteln Säugetiere und Mensch ausführlich behandelt.

Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Tiere und den Menschen

In der folgenden Zusammenfassung der Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Tiere werden die Stämme der Wirbellosen zusammengenommen, der Stamm der Wirbeltiere jedoch in Klassen getrennt behandelt. Um einen umfassenden Eindruck über Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht zu geben, werden auch Beispiele von nicht einheimischen Tieren aufgeführt. Im ganzen Kapitel geht es um die Auswirkung von *künstlichem Nachtlicht* auf Tiere. In den Untertiteln wird dies deshalb nicht wiederholt.

Die allgemein gehaltenen Formulierungen im Text werden im Anschluss an die Aussage soweit vorhanden durch Beispiele veranschaulicht, welche entsprechend gekennzeichnet sind (Bsp.). Die einzelnen Beispiele werden nicht kommentiert. Für die allgemeinen Folgerungen sei auf das Kapitel *Folgerungen aus den Literaturgrundlagen*, S. 41 verwiesen.

Invertebraten (Wirbellose)

Anziehung von Fluginsekten

Pro Strassenlampe sollen laut Schätzungen in den Sommermonaten 150 Nachtfalter angezogen werden und jährlich sollen in Deutschland während dieser Zeit insgesamt 150 Billionen Insekten an den Strassenlaternen verenden, darunter 150 Milliarden Nachtfalter (Eisenbeis & Hassel 2000, Strassmann 2002, DasErste 2003). Auch an Leuchtreklamen oder beleuchteten Wänden gehen viele Insekten zugrunde. Bsp.: Durch drei Buchstaben einer einzigen Leuchtreklame in der Grazer Innenstadt wurden im Jahresverlauf 350 000 Insekten angezogen, an einer grossen bestrahlten Fabrikwand wurden in einer Nacht 100 000 Insekten gezählt (Wüthrich 2001). Allerdings sagen alle diese Zahlen nichts über die Bedeutung für die Gesamtpopulation aus und es sind keine dokumentierten Beispiele von Nachtfalterarten oder -populationen bekannt, welche aus diesem Grunde ausgestorben wären.

Bsp.: Kolligs (2000) fand bei Insektenfängen unter Strassenlampen Insekten von 138 Familien. 40–90 % aller Insekten waren Moskitos (*Nematocera*), weitere häufige Gruppen waren Falter (*Lepidoptera*), Fliegen (*Brachycera*) und Käfer (*Coleoptera*). Unterschiede an verschiedenen Fangstandorten schienen mit den umgebenden Habitaten zusammenzuhängen.

Anlockwirkung auf Wasserinsekten

Künstliches Licht hat auf verschiedene Gruppen von fliegenden Wasserinsekten eine starke Anlockwirkung. Bsp.: Durchschnittlich wurden in den Sommermonaten während einer einzigen Nacht so viele Wasserinsekten (v.a. Köcherfliegen *Trichoptera*, Fliegen und Mücken *Diptera*) vom Licht einer einzigen Quecksilberdampf-Strassenleuchte (mit hohem UV-Anteil) angezogen, wie dies einem Schlupf an 22 m Uferlänge in 24 h entsprach (Scheibe 2000, 2003). An warmen Sommerabenden wurde dieses Ergebnis um das Vielfache übertroffen. Zudem zeigte sich, dass selbst nah verwandte Arten in sehr unterschiedlichem Mass auf das Licht reagieren. Durchschnittlich wurden etwa 40 meter der schlüpfenden Wasserinsekten des Bachufers vom Lampenbetrieb angezogen.

Mechanismus der Anlockwirkung von Insekten und Konsequenzen

Wenn Nachtfalter in den Bereich von künstlichem Licht gelangen, ziehen sie oft endlose Schleifen und Kreise in der Lichtsphäre. Sie sind im Licht gefangen. Man könnte diesen Mechanismus als Vakuumreiniger-, Fesselungs- oder Leitplankeneffekt bezeichnen (Eisenbeis 2002). Die Insekten sind durch diesen Effekt desorientiert. Dadurch verfliegen sie ihre Energievorräte an den Lampen und werden von ihrem normalen Lebenslauf abgehalten: Paarungs- und Wanderverhalten, Nahrungsaufnahme und Eiablage werden gestört. Zudem besteht die Gefahr, an der Lichtquelle zu verbrennen, gefangen zu bleiben und an Erschöpfung zu sterben. Im Licht gefangene Insekten sind eine leichte Beute für Fledermäuse, Spinnen oder andere Feinde (Frank 2002, Heiling 1999).

Anziehung und Meidung bei Spinnen

Nicht fliegende Gliederfüßer (*Arthropoden*) zeigen unterschiedliche Reaktionen auf Licht. Während einige Spinnen Licht immer meiden, nützen andere Licht wo immer möglich aus (Nakamura & Yamashita 1997). Bsp.: Für letzteres Verhalten bei uns wohl bekannt ist die Brückenkreuzspinne *Larinioides sclopetarius* (vgl. auch Kapitel *Lichtbeeinflusste Beuteansammlung zieht Feinde an*, S. 40). Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass die Weibchen dieser Spinnenart künstlich beleuchtete Orte aktiv aufsuchen, um ihre Netze zu bauen (Heiling 1999). Da diese Vorliebe auch Individuen zeigen, die im Labor aufgezogen und vorher nie künstlichem Nachtlicht ausgesetzt worden waren, wird vermutet, dass dieses Verhalten genetisch determiniert ist.

Veränderung der Vertikalwanderung von Wasserflöhen

Seen in städtischer Umgebung sind einem 100-mal stärkeren Lichtlevel ausgesetzt als Seen in ländlicher Umgebung (Moore et al. 2000). Bsp.: Lichtemissionen bei Seen verändern die Vertikalwanderung von Wasserflöhen *Daphnia*, einerseits in der Höhe der vertikalen Bewegung und andererseits in der Anzahl der wandernden Individuen (vgl. *Lichtabhängige Vertikalwanderung des Zooplanktons*). Sie wandern weniger weit hoch und weniger Individuen sind beteiligt (Moore et al. 2000).

Kommunikation bei Glühwürmchen

Innerartliche visuelle Kommunikation kann durch künstliches Nachtlicht beeinträchtigt werden. Bsp.: Weibliche Glühwürmchen *Lampyridae* (Leuchtkäfer) geben zur Anziehung von Männchen durch Biolumineszenz Signale ab, die diese bis zu einer Distanz von etwa 45 m wahrnehmen können. Künstliches Nachtlicht reduziert die Sichtbarkeit dieser Kommunikationssignale und beeinträchtigt das komplizierte visuelle Kommunikationssystem (Lloyd 1994, 2002).

Fische

Lichtabhängigkeit der Reproduktion

Das Lichtregime stellt in der Aquakultur ein wichtiger ökonomischer Faktor dar. Bsp.: Forellen und Lachse laichen normalerweise einmal im Jahr. Mit einem entsprechenden Lichtregime laichen sie zusätzlich 6 Monate später nochmals, was die Produktion das ganze Jahr über ermöglicht (Maisse & Breton 1996). Die Geschlechtsreife der Weibchen der Regenbogenforelle *Oncorhynchus mykiss* kann fast ganz gehemmt werden, wenn sie beim Zeitpunkt, da sie erstmals zu fressen beginnen, Dauerlicht ausgesetzt werden. Dies ermöglicht für den Handel eine grössere Produktion von zweijährigen Fischen, deren Wachstum nicht durch die Reproduktion gebremst wurde. Bsp.: Beim Atlantischen Heilbutt *Hippoglossus hippoglossus* wird das Ausschlüpfen der Jungfische ebenfalls durch Licht verzögert und kann so auf die Arbeitstage eingeplant werden (Anonymous 1999).

Aktivitätsänderungen

Die Juvenilen bestimmter Lachsarten *Oncorhynchus kisuth* und *O. tshawytscha* sind normalerweise nachts nicht aktiv. Bsp.: Die Beleuchtung mit Quecksilberdampflampen führt jedoch zu einer um 90 % grösseren Aktivität (Nemeth & Anderson 1992). Bsp.: Andererseits fressen bestimmte Fische wie die Regenbogenforelle *Oncorhynchus mykiss* und die Meeresforelle *Salmo trutta trutta* vor allem in dunklen Nächten, nicht aber in künstlich beleuchteten Arealen oder bei Vollmond (Contor & Griffith 1995, Scottish Anglers National Association 1998). Bsp.: Heilbutte *Hippoglossus hippoglossus* sind nachts ebenfalls aktiver. Bei künstlicher Beleuchtung bleiben sie in Bodennähe und sind weniger aktiv (Anonymous 1999). Das daraus folgende grössere Wachstum wird in der Aquakultur geschätzt.

Künstliche Beleuchtung als Leitsignal

Dass bestimmte Fische sich von Licht anziehen lassen, ist bekannt (z. B. Haymes et al. 1984). Dieses Verhalten wird ausgenützt, um Fische beispielsweise über Fischtreppen oder -schleusen bei Dämmen zu leiten (Haymes et al. 1984). Bsp.: Indirektes Licht von Quecksilberlampen vergrössert die Durchschwimmrate von Lachsen *Salmo salar* signifikant (Larinier & Boyer-Bernard 1991). Leuchtdauer, Lichtposition und -intensität scheinen wichtige Parameter für die Anziehung zu sein. So wurde die maximale Durchschwimmrate mehr als eine halbe Stunde nach dem Anzünden beobachtet und die Rate erhöhte sich um das 3- bis 8-fache im Vergleich zu ohne Licht. Bsp.: Bekannt ist auch, dass Larven von Korallenriff-Fischen von Licht angezogen werden. Versuche, Fischlarven bei Korallenriffen mit Hilfe von Licht anzusiedeln, haben gezeigt, dass bei den beleuchteten Riffen die Häufigkeit und Diversität der einwandernden Fische ebenso wie die Diversität der sich niederlassenden Fische grösser waren (Munday et al. 1998). Bsp.: Im Gegensatz dazu ist der Europäische Aal *Anguilla anguilla* als nachtaktiver Räuber negativ phototaktisch, weicht also Licht aus (Bruijs et al. 2002, Cullen & McCarthy 2000). Da die Aale auf ihren nächtlichen Wanderungen flussabwärts Richtung Meer die stärkste Strömung ausnutzen, geraten sie in die Turbinen der Kraftwerke. Schätzungsweise 40 % der Aale gehen in diesem Entwicklungsstadium zu Grunde. Mit einem Licht-Ablenksystem kombiniert mit starker Strömung gelingt es, immerhin etwa 74 % der Aale durch einen sicheren Durchgang zu leiten (Bruijs et al. 2002).

Anziehung von Feinden

Das Wanderverhalten und die Verteilung von Fischen kann wegen des Anlockeffekts des Lichts durch nächtliche Beleuchtung verändert werden. Bsp.: Durch Ansammlung in den beleuchteten Arealen kann sich das Mortalitätsrisiko in bestimmten Fischpopulationen während der Wanderung erhöhen, da die juvenilen Fische (z. B. Lachse, Heringe, Sandaale *Ammodytoidei*) in Flüssen Opfer der ebenfalls durch das Licht angezogenen Raubfeinde werden (Nightingale & Simenstad 2002). Bekannt ist auch, dass Raubfische ihre Vorteile an beleuchteten Fischtreppen, Überläufen und Brücken wahrnehmen und dort wandernde Lachse erbeuten (Nightingale & Simenstad 2002).

Amphibien

Blendung – Anziehung – Vermeidung von Licht

Amphibien sind fast ausschliesslich nachtaktiv. Künstliches Nachtlicht kann ihr Verhalten beeinflussen. Bsp.: Die visuellen Fähigkeiten von nachtaktiven Fröschen werden durch schnelle Lichtwechsel von Dunkel zu Hell oder Wechsel der Lichtintensität (Blendung) stark beeinträchtigt und erholen sich wahrscheinlich erst nach Minuten oder sogar Stunden (Buchanan 1993). Während dieser Zeit fehlt den Fröschen jegliche visuelle Information über Nahrung, Feinde und Artgenossen und ihre Orientierung ist unterbrochen. Bsp.: Bei Beleuchtung erscheinen bestimmte nachtaktive Amphibien eine Stunde später aus ihrem Versteck und verlieren so Zeit für die Nahrungssuche (Wise & Buchanan 2002).

Frösche und Kröten werden andererseits auch von Licht angezogen, sobald sich ihre Augen daran gewöhnt haben (Jaeger und Hailman 1973, Buchanan 2002, vgl. auch Kapitel *Artspezifische Phototaxis*, S. 22). Die Beutejagd kann durch künstliches Nachtlicht sogar erleichtert werden, wenn die Frösche die Nahrung wegen der starken Beleuchtung sehen oder weil eine grosse Menge Beute (Insekten) vom Licht angelockt wurde.

Verändertes Fortpflanzungsverhalten

Das Fortpflanzungsverhalten von nachtaktiven Fröschen kann sich bei künstlichem Nachtlicht ändern. Bsp.: Bestimmte Frösche rufen nicht bei hellem Licht (Longcore & Rich 2004). Da sie unter diesen Umständen nicht erfolgreich Weibchen anlocken können, kommt es nicht zur Paarung. Verhindert wird die Reproduktion auch bei Fröschen, die sich normalerweise nur bei sehr geringen Lichtverhältnissen paaren (Wise & Buchanan 2002). Bsp.: Die Froschweibchen von *Physalaemus pustulosus* sind bei erhöhter Lichtintensität weniger selektiv in der Männchenwahl. Vermutlich ist dies eine Reaktion auf das erhöhte Risiko, während der Paarung von einem Raubfeind überwältigt zu werden (Rand et al. 1997).

Innerartliche Verhaltensinteraktionen werden bei nachtaktiven und territorialen Salamandern vom Belichtungsgrad beeinflusst (Wise & Buchanan 2002). Bsp.: Experimente haben gezeigt, dass Salamander mehr Imponierverhalten zeigen, je mehr Licht vorhanden ist.

Reptilien

Desorientierung von Meeresschildkröten

Künstliches Nachtlicht kann zu Desorientierung von Organismen führen, wenn sie für ihre Orientierung auf dunkle Umgebung angewiesen sind. Bsp.: Die Meeresschildkröten *Caretta caretta* verlassen nach dem Schlüpfen ihr Nest an sandigen Stränden und orientieren sich unter normalen Umständen durch visuelle Reize in Richtung Meer. Sie scheinen von niedrigen, dunklen Silhouetten wegzukrabbeln, wie ursprünglich solchen der Dünenvegetation, und richten sich nach der Helligkeit des Meeres, welche durch das reflektierende Mond- und Sternenlicht verursacht wird. Auf diese Weise gelangen

sie rasch zum Ozean. Mit der intensiven Strandbeleuchtung ändern sich die Beleuchtungsverhältnisse, was Desorientierung der geschlüpften Schildkröten zur Folge hat (Salmon et al. 1995, Salmon & Witherington 1995).

Aktivitätsanpassung – Beutefang – Risiko

Die Auswirkung von künstlichem Licht auf Reptilien ist artspezifisch und daher schwer vorauszusagen. Viele typisch tagaktive Reptilienarten (Echsen, Schlangen) dehnen ihre Aktivität in der Nähe von künstlichem Licht in die Nacht hinein aus. Sie ziehen Vorteil aus einer neuen ökologischen Nische, der so genannten night-light niche (Perry & Fisher in Rich & Longcore 2006). Bsp.: Skinke *Lamprolepis smaragdina* sind normalerweise tagaktive Echsen. An hell erleuchteten Bäumen wurden nachts jedoch Individuen beobachtet, die kleine Insekten fressen, welche vom Licht angezogen worden waren (Perry & Buden 1999).

Nachtaktive Reptilien (Gecko, Schlangen) sind erfolgreicher im Beutefang, weil ihre Beute im Licht zahlreicher ist. Allerdings besteht dabei das Risiko, selber zur Beute zu werden (Perry & Fisher in Rich & Longcore 2006).

Vögel

Lichtregime beeinflusst Reproduktion bei Hühnern

Vögel sind durchwegs Langtag-Tiere, deren Gonaden (Keimdrüsen) im Langtag des Frühsommers entwickelt werden. Im Kurztag des Spätsommers und Herbstes degenerieren die Gonaden und die Legetätigkeit lässt nach (Häder 2004). Bsp.: Man kann bei Hühnern im Winter durch Zusatzlicht die Gonadentätigkeit (Eiablage) verlängern (Häder 2004, Sauveur 1996). Die Geschlechtsreife der Hennen kann durch ein entsprechend optimales Belichtungsregime vorverlegt und die Qualität des Hühnereis (Gewicht, Dicke, d. h. Solidität) kann verbessert werden (Sauveur 1996). Bsp.: Beim juvenilen Hahn kann die Geschlechtsreife und damit die Spermaproduktion durch längere Beleuchtung vorverschoben werden. Letztere nimmt jedoch markant ab, wenn beim adulten Hahn längere Beleuchtung beibehalten wird (De Reviers 1996).

Kombination von Licht und Nebel als Gefahr für Zugvögel – Mechanismus

Bei bestimmten meteorologischen Verhältnissen, bei niedriger Wolkendecke, Dunst oder Nebel, wird das Licht der Beleuchtung von Städten, Gebäuden oder anderen baulichen Strukturen an den Wassertröpfchen reflektiert, was zu einem erleuchteten Areal, einer Lichtglocke oder einem Lichtdom, führt (Manville 2000). Bei den gleichen Wetterverhältnissen können sich nachts ziehende Vögel nicht nach den Sternen orientieren und haben zudem ihre Fernorientierung über Landmarken verloren, da sie in niedriger Höhe unterhalb der Wolkendecke fliegen. Obwohl ihnen auch noch das Magnetfeld der Erde als Hilfsmittel zur Verfügung stehen würde, ziehen sie wenn immer möglich die optische Orientierung vor. Bei schlechter Sicht scheinen Vögel generell von Licht angezogen zu werden. Einmal im Lichtdom angelangt, gelingt es ihnen nicht mehr, einen Ausweg zu finden. Sie werden offenbar am Entweichen gehindert, sobald sie über eine

bestimmte Lichtschwelle gelangen. Bsp.: Als bei einem Fernsehturm die Beleuchtung versuchsweise kurzfristig abgeschaltet wurde, zerstreuten sich die Vögel, die den Turm umflogen, innerhalb weniger Minuten (Cochran et al. 1958).

In der Lichtglocke scheinen die Vögel die Orientierung zu verlieren. Bsp.: Zugvögel, die in die Lichtsphäre eines Fernmeldeturms gelangt waren, zeigten ein nicht lineares Flugverhalten: Sie flogen in Kurven oder Kreisen oder ohne spezielle Richtung und verbrachten so mehr Zeit beim Turm (Cochran et al. 1958, Larkin & Frase 1988). Dadurch entstanden in der kleinen Lichtsphäre grössere Konzentrationen von Zugvögeln und das Kollisionsrisiko mit andern Vögeln erhöhte sich.

Zugvögel im Lichtdom über Agglomerationen

Im Lichtdom über Agglomerationen können Hunderte von Vögeln nach stundenlangem Irrflug und Stress an Erschöpfung zu Grunde gehen. Bestenfalls gelangen die in der Lichtsphäre gefangenen Vögel in der zweiten Nachthälfte bei abnehmender Lichtimmission aus der Falle heraus. Wertvolle Energiereserven können jedoch auf diese Weise verloren gehen. Bsp.: Anhaltende Nebeltage in Kombination mit Lichtimmissionen führten in der Schweiz im Herbst 2004 zu Verlusten unter den Zugvögeln (Schweizerische Vogelwarte Sempach 2004; vgl. auch Kapitel *Nachtzug von Vögeln im schweizerischen Mittelland*, S. 48).

Zugvögel in der Lichtsphäre von kleineren beleuchteten Arealen

Auch kleinere beleuchtete Areale wie beleuchtete Schiffe, Gewächshäuser, Ölplattformen etc. können zur Desorientierung von nachts fliegenden Vögeln führen (Ogden 1996, Wiese et al. 2001, Trapp 1998, Shire 2000). Bsp.: In Amerika starben 1954 in zwei aufeinander folgenden Nächten 50 000 Zugvögel in ganzen Schwärmen in einem stark beleuchteten Flugplatzareal, und 1981 waren es über 10 000 Vögel, die im starken Scheinwerferlicht (Flutlicht) von Hochkaminen eines Kraftwerks umkamen, unter ihnen auch vom Aussterben bedrohte Arten (Guynup 2003). Die Liste solcher Einzelereignisse liesse sich beliebig verlängern.

Bsp.: In der Schweiz bekannt ist das Beispiel des Reklamescheinwerfers der Jungfraubahn in der Eiswand der Sphinx in den 1970er-Jahren. Dieser gegen Norden gerichtete Scheinwerfer verursachte vor allem in Nebelnächten während des Herbstzugs den Tod von Tausenden von Zugvögeln. Als die Scheinwerfer dann jeweils in Nächten mit Wolken auf oder unter der Scheinwerferhöhe ausgeschaltet wurden, konnten diese Begebenheiten verhindert werden (Schweizerische Vogelwarte Sempach; vgl. auch Kapitel *Nachtzug von Vögeln im schweizerischen Mittelland*, S. 48).

Towerkill

Das Phänomen des Towerkills wurde bereits 1886 erwähnt und bezeichnet den Tod von Zugvögeln an (beleuchteten) hohen Einzelobjekten wie Kaminen, Leuchttürmen, Fernseh- und Rundfunktürmen (Ogden 1996, Wiese et al. 2001, Trapp 1998, Shire 2000 u. a.). Bsp.: Es wurde von 1000 Zugvögeln berichtet, die in einer einzigen Nacht bei einem Leuchtturm umkamen.

Neuere Untersuchungen galten Fernseh- und Rundfunktürmen. Türme, die zur Flugsicherheit beleuchtet werden, bringen die nachts fliegenden Zugvögel bei klarem Wetter zum Ausweichen und verhindern die Kollision mit dem Turm und seinen Verspannungsdrähten: Die Beleuchtung ist bei solchem Wetter für die Vögel also von Vorteil. Bei Nebel entsteht jedoch in Kombination mit Licht eine Lichtglocke (vgl. oben) und die Orientierung der Vögel ist erschwert, was sich in einer breiteren Zugbahn äußert (Avery et al. 1976). In einer einzigen Nebelnacht können in der relativ kleinen Lichtsphäre eines Turms Hunderte von Vögeln gefangen sein und durch Kollision mit Turmstrukturen oder anderen Vögeln (vgl. oben) oder aus Erschöpfung zu Tode kommen (Avery et al. 1976). Laut einer Schätzung sterben in den USA durchschnittlich 2500 Vögel jährlich an jedem der 75 000 Fernmeldetürme (IDA 2003, Shire 2000). Von diesen Türmen ausgehende elektromagnetische Impulse scheinen im Gegensatz zu Licht keine Auswirkung auf Zugvögel zu haben, obwohl bestimmte elektromagnetische Felder wahrgenommen werden können (Bruderer et al. 1999, Avery et al. 1976).

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Anzahl der Vögel, die sich bei entsprechendem Wetter nahe der beleuchteten Türme aufhält, sowie das Flugverhalten mit der Art der Warnlichter zusammenhängen (Gautheraux & Belser 2002). Bsp.: Bei konstantem rotem Licht wurden mehr Vögel in der Nähe des Lichts beobachtet als bei sich rasch bewegendem weissem Licht, wo sie nicht häufiger waren als auf einem Kontrollareal ohne Turm. Bsp.: Als bei sechs Abluftkaminen eines Elektrizitätswerks das Scheinwerferlicht zur Flugsicherung mit schnell blinkendem Licht ersetzt wurde, verminderte sich die Kollision von Vögeln dramatisch (Science A Go Go 1999).

Kollision mit erleuchteten Wolkenkratzern

Wolkenkratzer werden aus dekorativen Gründen aussen und innen beleuchtet: Licht wird als Teil der Architektur eines Gebäudes aufgefasst. Unzählige Vögel kommen während ihres Zugs durch Kollision mit erleuchteten Bürotürmen in Städten wie Chicago, New York und Toronto um (Kousky 2004, FLAP, Trapp 1998 u. a.). Nach einer Schätzung sterben allein in den USA 98 bis 100 Millionen Vögel jedes Jahr, wenn sie in erleuchtete Fenster, meistens von Wolkenkratzern, hineinfliegen (IDA 2003, Kousky 2004). Offenbar geht die Gefahr dabei von der Blendwirkung aus: Die Vögel nehmen Hindernisse in ihrer Flugbahn nicht mehr wahr und fliegen dann direkt auf die Lichtquelle zu (Wüthrich 2001). Mit Abschaltung der Nachtinnenbeleuchtung kann der Verlust bei Vögeln um mehr als 80 % gesenkt werden (Kousky 2004, The Field Museum 2002).

Fehlgeleitete Meeresvögel

Bsp.: Einige Meeresvögel fressen in Küstennähe Plankton, das durch Biolumineszenz Licht ausstrahlt, werden also eigens von Licht angezogen. Fatalerweise werden diese Vögel auch von Leuchttürmen, beleuchteten Bohrplattformen und intensivem Licht, welches von Fischern für den Fang von Tintenfischen eingesetzt wird, angezogen und können so zu Tode kommen (Guynup 2003, Wiese et al. 2001).

Bsp.: Eine Untersuchung über Meeresvögel (Sturmtaucher *Procellariidae*), die auf La Réunion durch Attraktion durch Licht getötet worden waren, zeigte, dass 94 % der getöteten Vögel eben flügge gewordene Junge waren (Le Corre et al. 2002). Mindestens 20–40 % der flügge gewordenen vom Aussterben bedrohten endemischen Barau-Sturmtaucher *Pterodroma barauii* eines Jahres kommen wegen der Attraktion durch Licht um. Bsp.: Ähnliches wird auch von Hawaii berichtet, wo flügge gewordene Sturmvögel dreier Arten bei ihrem ersten Flug von den Nistkolonien in den Bergen zum Meer durch künstliches Licht bei Gebäuden und Brücken angezogen werden, was eine jährliche Mortalität von schätzungsweise mehr als 10 % der Jungvögel zur Folge hat (Podolsky 2002, Reed et al. 1985). Bei Vollmond verkleinerte sich diese Attraktion dramatisch.

Reaktion auf plötzliche Lichtreize

Plötzlich auftauchende starke Lichtreize können einen Einfluss auf das Flugverhalten ziehender Vögel in der Nacht haben. Bsp.: Beim Einschalten eines Scheinwerfers zeigten die Vögel erhebliche Schreckreaktionen, obwohl lediglich 200 Watt – und nicht 1000 Watt und mehr wie bei den Reklamescheinwerfern bzw. Skybeamern – eingesetzt wurden (Bruderer et al. 1999). Die Vögel reagierten unterschiedlich: Während 25 % keine Reaktion zeigten, wichen 54 % von der Lichtquelle weg, 11 % flogen auf sie zu, 7 % stiegen auf oder sanken und 3 % verlangsamten hauptsächlich ihre Geschwindigkeit. Durchschnittlich wichen die Vögel 15° von ihrer ursprünglichen Flugrichtung ab, im Extremfall sogar 45°. Sie reduzierten zusätzlich ihre Fluggeschwindigkeit um 15–30 % und versuchten auch vertikal dem Lichtstrahl zu entweichen. Der Einfluss des Lichtstrahls war erst in einer Distanz von etwa 1 km nicht mehr messbar. Auch 40 s nach dem Auslösen des Lichtstrahls hatten die Vögel noch nicht zu ihrer ursprünglichen Richtung zurückgefunden.

Vogelgesang zu Unzeiten

Künstliches Nachtlicht kann bei Singvögeln zu Verhaltensänderungen führen. Bsp.: Blaumeisen *Parus caeruleus*, Kohlmeisen *Parus major* und Buchfinken *Fringilla coelebs* liessen ihren Territorialgesang in beleuchteten Stadtpärken am Morgen früher erschallen als im Wald (Bergen & Abs 1997). Bsp.: Eine amerikanische Spottdrossel *Mimus polyglottus*, die ihren nächtlichen Gesang nach der Paarung immer ausser bei Vollmond einstellt, singt nachts in künstlich beleuchtetem Areal (Derrickson 1988).

Strassenlicht und Nestdichte bzw. Brutbeginn von Uferschnepfen

Bsp.: Eine Untersuchung in einem offenem Feuchtgebiet mit einer stark befahrenen Strasse unter beleuchteten und unbeleuchteten Bedingungen ergab, dass die Nestdichte von Uferschnepfen *Limosa L. limosa* bei Beleuchtung der Strasse von der Entfernung zur Strasse abhing und in der Nähe der Strasse (bis zu 300 m) kleiner war als weiter weg (De Molenaar et al. 2000). Zudem wurde in der Nähe der beleuchteten Strasse ein späterer Brutbeginn beobachtet.

Schlafplätze im Schutze des Lichts?

Bsp.: Künstliche Beleuchtung scheint dagegen für Amerikanische Krähen *Corvus brachyrhynchos* von Vorteil zu sein: Die Beleuchtung war bei Bäumen mit Schlafplätzen höher als bei Bäumen ohne Schlafplätze (Gorenzel & Salomon 1995). Es wird vermutet, dass Krähen diese Schlafplatzwahl zur Feindvermeidung (Eulen) treffen.

Säugetiere

(Mensch siehe nächstes Kapitel, S. 36)

Künstliches Nachtlicht und innere Uhr

Nachtaktive Tiere, wie z. B. Mäuse, reagieren auf grössere Lichtintensität mit einer Verlängerung des circadianen Rhythmus (Häder 2004). Künstliches Nachtlicht scheint auf die innere Uhr von nachtaktiven Nagetieren nicht denselben Effekt zu haben wie natürliches Licht (IRD 1999). Bsp.: Tiere, die unter natürlichem Licht gehalten werden, zeigen eine exakter mit dem Licht korrelierte Anfangs- und Endaktivität und ihre nächtlichen Ruhephasen sind länger als diejenigen unter künstlicher Beleuchtung.

Lichtregime und Melatonin in der Tierproduktion

Der Einfluss des Lichts und des Hormons Melatonin auf die Reproduktion macht man sich in der Tierindustrie zu Nutze:

Bsp.: Melatonin kann verwendet werden, um bei Schafen einen Kurztag zu mimen, obwohl ihre Augen den natürlichen Langtag von Frühling oder Sommer empfangen. Damit die Periode der sexuellen Aktivität gesteuert werden kann, müssen Kurz- und Langtage in einem bestimmten alternierenden Rhythmus mit Melatonin gemimt werden. Die physiologische Fruchtbarkeit (Fekundität) der Auen (Mutterschafe) ist 30–40 Tage nach dem Einsetzen eines Melatonin-Implantates grösser als bei unbehandelten Schafen, und der Wurfzeitpunkt ist früher und über eine geringere Zeitspanne verteilt (Chemineau et al. 1996).

Bsp.: Beim Widder (Schafbock) erlaubt ein Melatonin-Implantat ein vorgezogenes Hodenwachstum und eine grössere Spermaproduktion. Wenn man eine intensive Spermaproduktion ausserhalb der Reproduktionssaison wünscht, muss der Implantierung eine Stunde Nachtbelichtung vorausgehen. Neben der Stimulation des Hodenwachstums werden das Sexualverhalten und die Spermaproduktion verbessert und die Jungenzahl (Fertilität) erhöht. Durch ein bestimmtes Lichtregime kann die Spermatogenese (Spermazellenbildung) bei den Schafböcken über die nachfolgenden Jahre gesteigert werden (Chemineau et al. 1996).

Bsp.: Bei den Ziegen besteht eine grosse Nachfrage, die Brunft entgegen der natürlichen Jahreszeit in den April bis Juli zu verlegen. Es wird empfohlen, der Ziege neben einem bestimmten Lichtregime (mit nächtlicher Belichtung) über die Periode von 2 Monaten ein Melatonin-Implantat zu setzen. Dieselbe Behandlung gilt den Ziegenböcken. Die Geschlechter müssen während 35 – 70 Tage getrennt sein, bevor sie einander zugeführt werden. Unter diesen Bedingungen entspricht die Jungenzahl (Fertilität) annähernd derjenigen während der natürlichen Reproduktionszeit (Chemineau et al. 1996).

Bsp.: Beim Ziegenbock kann ähnlich wie beim Schafbock durch ein entsprechendes Lichtregime eine hohe Spermaproduktion von guter Qualität über mehr als 3 aufeinander folgende Jahre erreicht werden (Chemineau et al. 1996).

Bsp.: Die Eierstöcke von Pferdestuten sind während des Winters normalerweise inaktiv. Werden die Stuten nach der Wintersonnenwende 35 Tage lang 14.5 h pro Tag bei künstlichem Licht gehalten, findet der erste Eisprung des Jahres zu einem früheren Zeitpunkt statt (Guillaume 1996, 1999). Ab mehr als 16 h und weniger als 13 h Beleuchtung pro Tag findet keine Stimulation statt und eine länger als 35 Tage dauernde Behandlung bringt keine weitere Verschiebung des Eisprungs.

Lichtscheu

Bsp.: Vermeidung von beleuchteten Arealen ist von umherstreifenden *Pumas Felis concolor* bekannt. Sie ist so ausgeprägt, dass in Betracht gezogen werden kann, den Zugang zu menschlichen Ansiedlungen mit Licht zu schützen (Beier 1995). Diese Lichtscheu wirkt sich natürlich negativ auf diese Tierart aus, wenn ihr Lebensraum durch Licht zerschnitten wird (Barriere-Effekt). Bsp.: Die Santa Rosa Strandmaus *Peromyscus polionotus leucocephalus* vermeidet Licht ebenfalls auf der Nahrungssuche (Bird et al. 2004).

Bsp.: Beim Schloss Hallwil nutzen Zwerg- und Wasserfledermäuse für die Jagd nur die dunklen, nicht aber erhellten Bereiche des Schlossgrabens und des vorbeifliessenden Baches (Beck 2005).

Fassadenbeleuchtung – eine Bedrohung für Fledermäuse?

Verschiedene Fledermausarten versammeln sich im Sommerhalbjahr zur Fortpflanzung in Estrichen von Gebäuden, die als Fledermausquartiere bezeichnet werden. Diese Arten zeigen eine grosse Empfindlichkeit auf Licht in der Nähe ihres Quartiers, was vermutlich mit der Feindvermeidung zusammenhängt.

Bsp.: Fledermäuse fliegen zu späterer Stunde aus, wenn die nähere Umgebung des Quartiers unter künstlichem Lichteinfluss steht, beispielsweise durch Fassadenbeleuchtung, und früher, wenn in der unmittelbaren Nähe Deckung durch Bäume vorhanden sind (Theiler 2004, Britschgi et al. 2004). Am Morgen kehren sie bei Deckung entsprechend später zurück. Sie gewinnen damit mehr Zeit für die Nahrungssuche.

Bsp.: Bei unbeleuchteten Fledermausquartieren hat sich gezeigt, dass die Tiere verschiedener Fledermausarten (Grosse Hufeisennase *Rhinolophus ferrumequinum*, Grosses Mausohr *Myotis myotis*, Braunes und Graues Langohr *Plecotus auritus*, bzw. *P. austriacus*) das Gebäude am Abend über die dunkelste Seite verlassen. Die von der Abenddämmerung oder von Strassenlampen erhellten Gebäudeseiten werden gemieden (Beck 2005).

Bsp.: Als bei einer Kolonie von Grauen Langohren (*Plecotus austriacus*) drei Turmseiten beleuchtet wurden, flogen die Fledermäuse nur noch auf der unbeleuchteten Seite aus. Bsp.: In zwei Wochenstubenquartieren des Grossen Mausohrs flogen die Tiere wegen brennender Estrichlampen und einer Lichtschranke mit hellem Licht nicht zur üblichen Zeit aus. Als die Lampen gelöscht wurden, flogen die Tiere sofort aus (Beck 2005).

Helles Licht in unmittelbarer Nähe von Ausflugsöffnungen bei Fledermausquartieren kann schwer wiegende Auswirkungen auf lichtscheue Fledermausarten haben. Bsp.: Die Weibchen der Wochenstube von Grossen Mausohren (*Myotis myotis*) in der Stadtkirche in Rheinfelden AG flogen bei einem dreitägigen Stadtfest mit Licht und Laserblitzen eine Stunde später aus als üblich (Krättli & SSF 2005, Beck 2005). Nach dem Anlass behielten sie dieses Verhalten für einige Tage bei. Die Folge war, dass ein Drittel der Jungen umkam. Langfristige Folgen waren, dass die Tiere andere Ausflugsöffnungen benutzten. Die vor dem Anlass benutzten Öffnungen wurden aufgegeben. Bsp.: In einem Quartier wurden einzelne vom Aussterben bedrohte Grosse Hufeisennasen (*Rhinolophus ferrumequinum*) registriert. Seit die Kirche und die Ein- und Ausflugsöffnung zeitweise beleuchtet werden, sind keine Tiere mehr beobachtet worden (Beck 2005).

Attraktion durch Beuteansammlung?

Bsp.: Beleuchtete Strassen werden von bestimmten Fledermäusen (*Nyctalus*, *Eptesicus*, *Pipistrellus*) zur Insektenjagd aufgesucht (Blake et al. 1994, Rydell & Baagøe 1996, Haffner & Stutz 1985–86). Es ist anzunehmen, dass die Fledermäuse damit auf das vergrösserte Nahrungsangebot reagieren (vgl. auch Kapitel *Räuber-Beuteverhalten*, S. 40).

Blendung und ihre Auswirkungen

Nachtaktive Säugetiere haben unter anderem grosse Pupillen, welche mehr Licht durchtreten lassen und eine stäbchenreiche oder sogar beinahe zäpfchenfreie Retina (Fledermäuse). Das Stäbchensystem ist hoch sensitiv, d. h. reagiert auf relativ wenige Photonen. Die Fähigkeit, scharf zu sehen, ist jedoch gering. Nachtaktive Säugetiere werden durch helles Licht stark geblendet, da die Stäbchen schon bei Dämmerlicht nicht mehr reagieren, d. h. bereits schon angeregt sind. Während die Helladaptation nach lediglich einigen Sekunden erreicht ist, dauert die Dunkeladaptation 10–40 min (Beier in Rich & Longcore 2006).

Unabhängig vom Sehsystem einer Tierart erscheinen die umgebenden dunkleren Areale neben hell erleuchteten Flächen schwarz, sodass die Tiere desorientiert sind und ungern in den uneinsehbaren Schatten fliehen, was beispielsweise bei Wild beobachtet werden kann (Beier in Rich & Longcore 2006). Bsp.: Dispersierende Pumas (*Puma concolor*) können nicht erkennen, wie das Gelände auf der gegenüber liegenden Seite einer beleuchteten Strasse aussieht. Sie überqueren die beleuchtete Strasse daher erst in der folgenden Nacht, nachdem sie das gegenüber liegende Areal tagsüber von einer Deckung her angesehen haben. Sie begeben sich dann jedoch nur auf die andere Seite, wenn sie dort Naturland, nicht aber Industriegelände erwartet (Beier 1995, Beier in Rich & Longcore 2006).

Menschen

Die folgende Zusammenfassung beschränkt sich auf Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht im Zusammenhang mit der circadianen Uhr, die Angaben stützen sich auf Pauley (2004).

Alle Organismen verfügen über eine innere Uhr, welche die physiologischen Vorgänge diktiert und beispielsweise vorgibt, wach zu sein, respektive zu schlafen. Dieses interne Programm ist genetisch festgelegt und neuronal fest verschaltet. Damit die innere Uhr auf den 24-h-Rhythmus (circadianer Rhythmus) synchronisiert werden kann, ist sie vom Rhythmus des Naturtages abhängig, den dunklen Nächten und dem Tageslicht. Die circadiane Uhr reagiert äusserst sensitiv auf die Dunkel-Hell-Zyklen und wird bei den Säugetieren durch Photonen in Gang gebracht, welche auf spezialisierte Zellen in der Netzhaut des Auges treffen.

Homo sapiens bildet darin keine Ausnahme. Seit Millionen von Jahren werden die Rhythmen in unserem Körper ebenso vom Tageslicht und der Dunkelheit der Nacht bestimmt. Das Licht des Feuers und das gelbe Licht der ersten Glühbirnen beeinflussten die circadianen Mechanismen kaum. Heute wird jedoch ein anderer Umgang mit Beleuchtung gepflegt und mehr Licht von blauer Wellenlänge wird ausgestrahlt.

Rezeptorzellen für die biologische Uhr

Die Funktion von bestimmten Nervenzellen unserer Netzhaut («Retinale Ganglionzellen» = RGC) war bis vor kurzem unklar. Sicher war, dass die RGC nicht für unser Sehen zuständig sind. Erst 2002 wurde erkannt, dass die Fortsätze dieser Zellen mit den paarigen Nervenkerne im Hypothalamus an der Basis des Gehirns, den so genannten suprachiasmatischen Kernen, verbunden sind. Diese Kerne steuern die circadianen Rhythmen und gelten als biologische Uhr.

Die RGC liegen tief in der Netzhaut unter den Stäbchen und Zäpfchen. Sie enthalten das Photopigment Melanopsin, welches auf blaues Licht empfindlich ist: Die RGC und ihre Fortsätze feuern maximal, wenn sie durch blaues Licht der Wellenlänge 464 – 484 nm stimuliert werden. Nach der Aufnahme von Photonen senden die RGC elektrische Impulse über die Nervenbahnen zur circadianen Uhr und übermitteln unserem Körper, wie er die vielfältigen Körperfunktionen zu regulieren hat, beispielsweise die Körpertemperatur, die Ausschüttung von Hormonen aus der Hypophyse des Gehirns, Schlafmuster und unsere Produktion von Melatonin.

Blaues Licht in der Nacht und Melatonin-Produktion

Das Hormon Melatonin existiert schon über 3 Billionen Jahre und ist in Pflanzen und Tieren und sogar in Algen vorhanden. Melatonin wird beim Menschen in der Dunkelheit in der Zirbeldrüse synthetisiert, einer erbsengrossen Drüse im Zentrum des Gehirns. Produktion und Hemmung von Melatonin sind ein circadian gesteuertes Ereignis. Der Melatoninspiegel ist zwischen 2 und 4 Uhr morgens am höchsten. Bei Unterbruch der Dunkelheit durch künstliches Licht wird die natürliche Produktion von Melatonin unterdrückt. Versuche bei Menschen haben gezeigt, dass sie am stärksten reduziert wird, wenn die Probanden bei offenen Augen für 90 min zwischen 2 und 3 Uhr 30 morgens mit monochromatischem blauem Licht der Wellenlänge 464 nm und einer Beleuchtungsstärke von nur 0.1 lx, Dämmerlicht entsprechend, ausgesetzt werden.

Melatonin reguliert und schützt

Melatonin hat schlaffördernde Eigenschaften und reguliert den ausgeglichenen physiologischen Zustand des Menschen. Es treibt das Immunsystem an und steuert die Produktion von anderen Hormonen, die dann ihrerseits wieder die Sekretion von Hormonen regulieren, welche unsere endokrinen Drüsen wie Schilddrüse, Bauchspeicheldrüse, Eierstöcke, Hoden oder Nebennierendrüse kontrollieren. Melatonin ist ein Antioxidanz, welches freie Radikale (äusserst reaktionsfähige Moleküle und Atome), aufnimmt und loswird, die während der Zellatmung in den Zellen entstehen und Zellen zerstören, und hat entsprechend krebshemmende Wirkung. Melatonin schützt das Herz-Kreislaufsystem, stabilisiert den biologischen Rhythmus des Körpers und ermöglicht den nächtlichen Zyklus von Ruhen und Reparatur.

Melatonin und Krebs im Tierversuch

Experimente bei nachtaktiven Ratten haben gezeigt, dass der nächtliche Melatoninspiegel bei Dauerlicht reduziert und die Wachstumsrate von implantierten Lebertumorzellen erhöht ist. Sogar weisses Dämmerlicht von nur 0.2 lx reicht aus, um Melatonin zu unterdrücken. Das Wachstum der Lebertumorzellen war bei dieser Beleuchtungsstärke ähnlich wie bei weissem Licht von 300 lx (vgl. Tab. 1). Dies zeigt, wie hochsensibel das circadiane System bei Ratten ist, das durch Licht auf der Netzhaut in Gang gesetzt wird.

In anderen Experimenten wurden Ratten menschliche Brustkrebszellen implantiert. Bei Ratten, die im Dauerlicht bei 300 lx gehalten wurden, nahmen die Krebszellen mehr Fettsäure (*Linoleic acid*) auf und wuchsen schneller als bei Ratten in normaler Licht-Dunkel-Umgebung. Bei einer Zugabe von Melatonin verlangsamte sich die Wachstumsrate des Krebses bei diesen Tierexperimenten mit Brust- bzw. Lebertumorzellen um 70%, und es wurde weniger Fettsäure aufgenommen, was die krebstatistische Eigenschaft von Melatonin bestätigt.

Nachtlicht und menschliche Gesundheit

Menschen, die am Tag in Gebäuden arbeiten, erhalten durch das künstliche Licht auch bei guten Beleuchtungsverhältnissen nicht ausreichend Licht. In der Nacht sind die Menschen heute oft zu viel Licht ausgesetzt. Licht in der Nacht kann akute Effekte in Physiologie und Wachheit bzw. Schläfrigkeit haben, deren Ausprägung von der Zeit, der Intensität, der Dauer und der Wellenlänge des Lichts abhängig sind (Cajochen 2005). Es wird vermutet, dass die Gesundheit der Menschen ohne normalen Zyklus von Hemmung und Produktion des Hormons Melatonin im Licht-Dunkel-Zyklus negativ beeinflusst wird. Neuere epidemiologische Studien haben gezeigt, dass bei Schichtarbeiterinnen mit Nachtarbeit eine 36 bis 60 % höhere Brustkrebsrate vorliegt (Pauley 2004). Je länger eine Person Schicht gearbeitet hat, desto höher ist die Krebsrate. Die Krebsrate bei Dick- und Mastdarm von Schichtarbeiterinnen, welche über mindestens 15 Jahre hinweg mindestens 3 Nächte pro Monat gearbeitet hatten, war ebenfalls um 35 % erhöht. Blinde Frauen, deren Augen gar kein Licht empfangen, welches die Melatonin-Produktion beeinflussen könnte, haben 40 % seltener Brustkrebs, seltener auch als Menschen, deren Augen mindestens ein bisschen Licht aufnehmen können.

Schichtarbeiter zeigen auch nach 20 Jahren Schichtarbeit keinen an die Nachtarbeit angepassten Rhythmus (Foster & Wulff 2005). Neben der höheren Rate für Brust und Darmkrebs ist ein ganzes Spektrum weiterer Auswirkungen bekannt: gestörte circadiane Rhythmen (Hormonproduktion, Zellteilung, Thermoregulation etc.), Herz-Kreislauf-Störungen mit erhöhter kreislaufbedingter Mortalität, Magen-Darm-Probleme (z. B. 8-fach grösseres Risiko für Magengeschwür), Schlafprobleme, chronische Müdigkeit, Konzentrationsschwierigkeiten, psychische Probleme (z. B. höhere Depressionsrate), grösseres Unfallrisiko. Mit gezielter Lichtbehandlung und/oder Melatoningabe sowie spezifischen Verhaltensmassnahmen (lichtabsorbierende Brillen auf dem Heimweg, Nahrung) können negative Auswirkungen von Schichtarbeit oder bei Überfliegen mehrerer Zeitzonen (Jetlag) gemildert werden (Griefahn 2003, Cajochen et al. 2003).

Mechanismus der Schutzwirkung von Melatonin

Über 90 % der Darmkarzinome und über 80 % des normalen Brustgewebes haben Melatoninrezeptoren. Es wird vermutet, dass die Schutzwirkung von Melatonin durch seine Fähigkeit, sich an solche Rezeptorstellen anzuheften, erzielt wird. Durch die Unterdrückung der Melatonin-Produktion bei künstlichem Nachtlicht fehlt jedoch der Schutz durch das Melatonin an den Rezeptorstellen. Diese können nun Fettsäure aufnehmen, welche ihrerseits das Wachstum der Krebszellen begünstigt (vgl. Kapitel *Melatonin und Krebs im Tierversuch*, S. 37).

Als Ursache für die heute grössere Rate bei Brust- und Darmkrebs in Industrieländern wird folgende Hypothese postuliert: Ist das Auge am frühen Morgen Licht mit blauer Wellenlänge in normaler Beleuchtungsstärke ausgesetzt, wird die Melatoninproduktion unterdrückt, was in Kombination mit fettreicher Ernährung zu einer höheren Rate von Brust- und Darmkrebs führt.

Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Lebensgemeinschaften

Die Verhaltensweisen, die Tierindividuen auf künstliches Nachtlicht zeigen, können auch die Interaktion zwischen Tierarten einer Lebensgemeinschaft beeinflussen, beispielsweise die Konkurrenz oder das Räuber-Beute-Verhalten.

Zwischenartliche Konkurrenz

Nischendifferenzierung und Diversität bei künstlichem Nachtlicht

Künstliches Nachtlicht kann die Interaktion zwischen Gruppen von Tierarten unterbrechen, welche Ressourcen auf einem Lichtgradienten teilen. Bsp.: Die Zeiten der Nahrungsaufnahme werden aufgeteilt, indem verschiedene Arten unterschiedliche Lichtintensitäten bevorzugen, wie dies unter mehreren Amphibienarten der Fall ist (Buchanan 1993, Longcore & Rich 2004, Wise 2001). Diese Arten müssen allerdings nicht zwangsläufig nebeneinander vorkommen und zeigen zudem auch noch andere ökologische Nischendifferenzierungen.

Wenn es nicht genügend dunkel ist, werden lichtempfindliche Arten an der Nahrungsaufnahme gehindert und verschwinden aus dem Gebiet. Bsp.: Die Diversität von Salamandern vermindert sich unter künstlichem Nachtlicht.

Begünstigung von Fledermausarten durch Strassenbeleuchtung

Beleuchtete Strassen ziehen Insekten an und vergrössern in diesem Gebiet das Nahrungsangebot für Fledermäuse. Bsp.: Nutzen davon ziehen allerdings vor allem die in einem bestimmten Gebiet häufig vorkommenden und schnell fliegenden Arten. Arten, die in der Minderheit sind, werden oft gänzlich ausgeschlossen und wählen entsprechend andere Jagdgebiete (Ryddell & Baagøe 1996).

Das Jagdverhalten von Fledermäusen an Strassenlampen ist je nach Art verschieden. Bsp.: Schnell fliegende Arten, beispielsweise Abendsegler (*Nyctalus noctula*) und Zwergfledermäuse (*Pipistrellus pipistrellus*), die zur Jagd allgemein offene Gebiete aufsuchen, jagen in regelmässigen Routen entlang der Lampen hin und her. Langohrfledermäuse (*Plecotus*), Hufeisennasen (*Rhinolophus*) und gewisse Myotisarten, die langsam fliegen und entsprechend offene Gebiete meiden, tauchen nur sehr kurz in den Lichtkegel einer Lampe mit Vegetation in der Nähe, packen eine Beute und verschwinden wieder in der Vegetation (Blake et al. 1994, Ryddell & Baagøe 1996).

Räuber-Beute-Verhalten

Vorteil und Nachteil von künstlichem Nachtlicht

Einerseits kann es von Vorteil sein, wenn Tierarten durch künstliches Nachtlicht ihre Aktivitätsphase verlängern können und entsprechend mehr Zeit zur Nahrungsaufnahme haben oder erfolgreicher im Beutefang sein können, andererseits kann künstliches Nachtlicht auch mit dem Risiko der Entdeckung durch einen Raubfeind einhergehen (Gotthard 2000, Buchanan 2002). Bsp.: Bei längerer Belichtung zeigen Schmetterlingslarven eine höhere Wachstumsrate, erliegen dadurch jedoch häufiger verschiedenen Primärparasiten, z. B. Schildwanzen, welche die Larven aussaugen (Gotthard 2000). Eine ungefähr viermal grössere relative Wachstumsrate war verbunden mit einem 30 % höheren täglichen Risiko, erbeutet zu werden.

Kleine Nagetiere fressen weniger bei hohem Beleuchtungsgrad, vermutlich, um Feinde zu vermeiden (Lima 1998). Bsp.: Beobachtet wurden Wüstennagetiere, die ihre Nahrungsaktivität reduzierten, wenn sie dem Licht einer einzigen Laterne ausgesetzt wurden (Kotler 1984). Bsp.: Ähnliche Anpassungen zeigen auch Fledermäuse (vgl. Kapitel *Fassadenbeleuchtung – eine Bedrohung für Fledermäuse?*, S. 34).

Lichtbeeinflusste Beuteansammlung zieht Feinde an

Wo sich viel Beute versammelt, finden sich auch ihre Feinde ein. Bsp.: Die nachtaktive Brückenkreuzspinne *Larinioides sclopetarius*, die in der Nähe von Wasser lebt und ihr Radnetz häufig auf Brücken spinnt, sucht für den Bau ihres Netzes aktiv künstlich beleuchtete Orte des Geländers auf, wo eine grössere Dichte an Insekten fliegt als an unbeleuchteten Orten des Geländers (Heiling 1999; vgl. auch Kapitel *Anziehung und Meidung bei Spinnen*, S. 26).

Bsp.: Von künstlichem Licht angelockte Nachtfalter oder andere Insekten sind ein gefundenes Fressen für Tierarten wie Vögel, Skunks, Kröten und Spinnen (Frank 1988). Bsp.: Zahlreiche Fledermausarten werden ebenfalls von Insekten angezogen, welche um Lichtquellen schwirren (Frank 1988, Blake et al. 1994). Bei beleuchteten Strassen wurden mehr Fledermäuse beobachtet, 2 bis 5 Individuen pro km, im Extremfall bis 20 Individuen pro km, als bei unbeleuchteten Strassen, wo es weniger als ein Individuum pro km war, unabhängig von den Habitaten in der Umgebung (Ryddell & Baagøe 1996). Je weiter nördlich, desto weniger jagende Fledermäuse wurden beobachtet: Der Kontrast zwischen den Strassenlampen und dem Hintergrund beeinflusste über das Insektenangebot die Häufigkeit der Fledermäuse.

Bsp.: Seehunde wurden beobachtet, die sich auf ihrer Migration flussabwärts unter künstlicher Beleuchtung zusammenfanden, um junge Lachse zu fressen. Wurde das Licht ausgeschaltet, sank der Jagderfolg (Yurk & Trites 2000). Unter Licht versammelte Fische sind auch für andere Raubfeinde (z. B. Raubfische) eine Attraktion.

Feinderkennung durch künstliches Licht verunmöglicht

Genetisch fixierte Anpassungen von potentiellen Beutetieren an Räuber mit dem entsprechenden Feindvermeiderverhalten können durch künstliches Licht gestört werden. Bsp.: Das Licht von Quecksilberlampen interferiert mit der normalen Fähigkeit des Tympanalorgans bestimmter Nachtfalter *Operophtera ssp.*, die Ultraschallrufe von Fledermäusen für den Beutefang wahrzunehmen und verhindert dadurch, mit einer Gegenstrategie dem Feind zu entgehen (Svensson & Rydell 1998).

Folgerungen aus den Literaturgrundlagen

Alle Organismen haben sich in ihrer Evolution mit ähnlichen Mechanismen dem Tag-Nacht-Wechsel angepasst. Es ist deshalb zu erwarten, dass eine Änderung des Tag-Nacht-Rhythmus und künstliche Nachtbeleuchtung nicht ohne Folgen für die Organismen bleibt.

Lichtinduzierte Vorgänge bei den Pflanzen und die Wirkung von Licht auf unterschiedliche Tierarten wurden auf experimentellem Weg untersucht (Photobiologie). Die Auswirkungen von künstlicher Nachtbeleuchtung im Naturtag sind allerdings noch kaum erforscht. Um zu einer Beurteilung über eventuell negative Auswirkungen zu kommen, muss daher vor allem auf experimentelle Untersuchungen oder auf augenfällige Ereignisse zurückgegriffen werden (Towerkill etc.). In der medizinischen Forschung zeigen experimentelle Untersuchungen an Tieren und Untersuchungen von Nachtarbeitenden, dass die Wirkung von Nachtlicht auf den Menschen nicht zu verharmlosen ist.

Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Pflanzen

Bei den Pflanzen sind es wohl vor allem die Kurztag-Pflanzen, welche unter künstlichem Nachtlicht leiden, da sie beispielsweise oberhalb einer kritischen Tageslänge vegetativ bleiben, d. h. schon gar nicht zum Blühen kommen (vgl. Kapitel *Tageslänge löst Blütenbildung aus*, S. 21). Bei manchen Pflanzen erlahmt im Dauerlicht das Photosynthesevermögen. Für andere Pflanzen mag längere Beleuchtung ein Vorteil sein. Es ist anzunehmen, dass allfällige negative Auswirkungen wiederum von der Belichtungsdauer, von der Helligkeit und vom Lichtspektrum abhängen.

Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Tiere

Lichtinduzierte Verhaltensänderungen können sich für Tiere positiv oder negativ auswirken. So ist die Verhaltensanpassung für die einen Tierarten ein Vorteil, kann aber gerade dadurch für andere zu einem Mortalitätsrisiko werden (Konkurrenz, Räuber-Beute-Verhalten) oder sie bietet für eine Tierart einerseits einen Vorteil, birgt aber andererseits auch ein Risiko (Nahrungsaufnahme – Auffälligkeit für Fressfeind). Über die Fitness von Tieren mit lichtinduzierten Verhaltensänderungen ist nichts bekannt.

Als Beispiel für Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Tierorganismen sei auch der ursprünglich tagaktive Mensch angeführt, für welchen Nachtlicht ein empfindliches Gesundheitsrisiko darstellen kann, wenn er sich davor nicht schützt (vgl. Kapitel *Nachtlicht und menschliche Gesundheit*, S. 38).

Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Lebensgemeinschaften und bedrohte Arten

Ein ewiger Vollmond, wie es die künstliche Beleuchtung in vielen Gebieten darstellt, wird lichttolerante Tier- und Pflanzenarten begünstigen und andere ausschliessen. Es wird befürchtet, dass es dadurch zur schleichenden Artenverschiebung oder zur Artenverarmung kommen könnte. Von künstlichem Nachtlicht besonders betroffen wären Arten, die nur wenig mobil sind und in ihrer Lebensspanne nur eine geringe Wegstrecke zurücklegen, bzw. an ein eng umgrenztes Habitat gebunden sind. So wird künstliche Beleuchtung beispielsweise in naturnahen aquatischen Ökosystemen als erheblicher Eingriff auf Wasserinsekten qualifiziert (Scheibe 2000, 2003).

Künstliche Beleuchtung könnte auch die interspezifische Konkurrenz und die Räuber-Beute-Beziehungen verändern, was wiederum Auswirkungen auf die Struktur der Lebensgemeinschaft haben könnte.

Wenn eine grosse Anzahl von Tieren durch Lichteinflüsse umkommt, ist es schwierig zu beurteilen, wie schwer wiegend sich dies für die ganze Population der Tierart auswirkt. Der Zeitpunkt des Todes im Reproduktionszyklus sowie die Populationsgrösse sind Faktoren, die dabei berücksichtigt werden müssen.

Unter den nachtaktiven Insekten, welche durch künstliches Nachtlicht umkommen, sind immer auch bedrohte Arten (z. B. Nachtfalter). Ein Rückgang oder gar Aussterben von Insektenpopulationen aufgrund von künstlichem Licht muss vor allem in isolierten, kleinen Populationen befürchtet werden, wo Habitate durch die städtische Entwicklung fragmentiert werden. Ein entsprechendes Beispiel ist bisher jedoch nicht bekannt geworden.

Unter den nachts ziehenden Vögeln, die durch den Einfluss von künstlicher Beleuchtung umkommen, finden ebenfalls vom Aussterben bedrohte Arten ihren Tod (Trapp 1998, Le Corre et al. 2002, Podolsky 2002, Reed et al. 1985). Es wird vermutet, dass diese Ausfälle relevante Auswirkungen auf Populationen dieser Vogelarten haben könnten.

Barriereeffekt von künstlichem Nachtlicht

Befürchtet wird ein Barriereeffekt durch die langen linearen Beleuchtungsstrukturen entlang einer Strasse. Beim Abstand der Leuchten von 30 bis 50 Metern kann eine beleuchtete Strasse beispielsweise für viele nachtaktiven Insekten eine Barriere darstellen, die kaum überwunden werden kann. Über die Auswirkungen dieser Lebensraumzerschneidung auf die Insektenfauna fehlen bisher Untersuchungen (Scheibe 1999).

Ökosystem-Effekt von künstlichem Nachtlicht

Lichtbeeinflusste Ökosysteme könnten wichtige Veränderungen erfahren, welche durch das künstliche Nachtlicht allein oder in Kombination mit anderen Faktoren verursacht würden. Die grössten Auswirkungen würden Naturhabitate und offene, strukturfreie Gebiete erleiden, wie zum Beispiel Feuchtgebiete in der Nähe von Agglomerationen.

Ein Beispiel für den Ökosystem-Effekt könnte sich bei Seen in städtischer Umgebung abspielen, wo künstliches Nachtlicht zur verminderten Vertikalwanderung des Zooplanktons führen kann (vgl. Kapitel *Lichtabhängige Vertikalwanderung des Zooplanktons*, S. 23). Wenn weniger Zooplankton zum Grasens zur Oberfläche wandert, könnten die Algenpopulationen wachsen. Dies wiederum könnte einen ungünstigen Einfluss auf die Wasserqualität haben (wenig gelöster Sauerstoff, Toxizität, Geruchsproblem; Moore et al. 2000, 2002). Im Zusammenspiel mit anderen ungünstigen Faktoren kann dies eine Veränderung für die ganze aquatische Nahrungskette und für das Ökosystem eines Sees bedeuten.

Einfluss von Beleuchtungsstärke

Bereits Licht von geringer Beleuchtungsstärke kann in der Nacht einen negativen Einfluss auf Organismen haben (vgl. Kapitel *Beleuchtungsstärke und ihre Auswirkung*, S. 15). Entsprechend wären eine allgemeine Beschränkung der Beleuchtung und eine möglichst weit gehende Reduktion des Beleuchtungsniveaus jeglicher Beleuchtung angebracht.

Demgegenüber steht die Sicherheit von Menschen, welche durch entsprechende Beleuchtung gewährleistet oder zumindest verbessert werden kann. Der Gleichmässigkeit der Beleuchtung und der Blendbegrenzung müssen dabei besonders Beachtung geschenkt werden (vgl. Kapitel *Hell-Dunkel-Adaptation des menschlichen Auges*, S. 16).

Einfluss von Licht unterschiedlicher Wellenlänge

Die Wellenlänge von ausgestrahltem künstlichem Licht scheint für die Auswirkungen auf Tiere und Menschen ein wesentlicher Faktor zu sein (vgl. Tab. 3). Unterschieden werden muss zwischen Auswirkungen von Licht im Zusammenhang mit der Melatonin-Produktion, die für Menschen und viele Tiere gleichermaßen gelten, und den übrigen Auswirkungen.

Für die nächtliche Melatonin-Produktion des Menschen ist Licht blauer Wellenlänge zwischen 464 und 484 nm der entscheidende Störfaktor und kann entsprechend negative Auswirkungen haben. So genannt weisses Licht enthält Licht des ganzen sichtbaren Spektrums, also auch Licht von blauer Wellenlänge. Die heutigen modernen Beleuchtungskörper mit weissem Licht setzen die Menschen immer mehr Licht mit blauer Wellenlänge aus. Die nächtliche Beleuchtung mit Lichtquellen, welche blaues Licht ent-

halten, kann bei offenen Augen ein potentielles Gesundheitsrisiko darstellen. Es ist zu vermuten, dass ähnliche gesundheitliche Risiken von weissem Licht mit blauem Wellenanteil auch für die meisten Tierarten gelten.

Beim Anlockeffekt durch Licht zeigt sich, dass UV-Licht und Licht im blauen Wellenbereich im Allgemeinen grössere Auswirkungen auf Insekten haben, dass es aber auch Arten gibt, die am stärksten von Wellenlängen im gelbgrünen oder gelborangen Bereich angezogen werden. So bietet das gelborange Licht von Natriumdampf-Hochdrucklampen der Wellenlänge von 570–630 nm beispielsweise keinen hinreichenden Minderungseffekt in aquatischen Ökosystemen.

In Abwägung der oben geschilderten potentiellen negativen Auswirkungen möge folgender Grundsatz gelten: Je geringer der Blau- und Ultraviolett-Anteil am Spektrum des ausgestrahlten Lichts, desto kleiner sind im Allgemeinen die negativen Auswirkungen auf die Organismen.

5 BEURTEILUNG KÜNSTLICHER BELEUCHTUNG IM SIEDLUNGSRAUM

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht bezüglich verschiedener Objekte im Siedlungsraum diskutiert und einer Beurteilung unterzogen. Daraus abgeleitete Richtlinien und Empfehlungen für einen umweltverträglichen Umgang mit künstlicher Beleuchtung in Lebensräumen oder von Objekten folgen im Kapitel *Grundsätze und Empfehlungen*. Für die Beurteilung wird folgende Unterteilung vorgenommen:

- Naturnahe Lebensräume
- Hochhäuser, Hochkamine
- Gebäude und Einzelobjekte
- Brücken
- Skybeamer, Laseranlagen
- Strassen als lineare Lichtelemente

Naturnahe Lebensräume

Naturschutzgebiete, Gebiete am Siedlungsrand und an Waldrändern sowie naturnahe Siedlungsgebiete, die verschiedene Lebensraumelemente wie Naturwiese, Feuchtgebiet, spärlich bewachsene Kiesfläche, Hecke, See, Fluss, Bach etc. enthalten, werden im Folgenden unter «naturnahe Räume» zusammengefasst. Sie sind ökologisch besonders wertvoll, da sie einen grösseren Artenreichtum aufweisen als andere Gebiete und die letzten Refugien für seltenere Arten im Siedlungsraum oder in Siedlungsnähe sind.

Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht

Die Fernwirkung einer einzelnen Lichtquelle wächst mit der Grösse des Raums, aus dem die Lampe als deutlicher Lichtpunkt im Kontrast zur Umgebung für die Insekten zu erkennen ist. Es ist daher anzunehmen, dass die Wirkung von Licht in naturnahen Räumen im Allgemeinen grösser ist als mitten im Siedlungsbereich.

Künstliche Lichtquellen in Hanglagen sind von grösserer Attraktivität als Leuchten, die in flachem Gelände stehen, unabhängig von der Einsehbarkeit des Lichts, was als so genannter «Hill-Topping»-Effekt von Schmetterlingen *Lepidoptera* bekannt ist (in Scheibe 2000).

Während einer einzigen Nacht können so viele fliegende Wasserinsekten vom Licht einer einzigen Leuchte angezogen werden, wie dies einem Schlupf an 22 m Uferlänge in 24 h entspricht und die Wirkung kann sich auf mehr als 40 m erstrecken. (vgl. Kapitel *Anlockwirkung auf Wasserinsekten*, S. 25). Selbst nah verwandte Arten reagieren jedoch in sehr unterschiedlichem Mass auf Licht (Scheibe 2000, 2003). Es besteht daher die Befürchtung, dass es durch künstliches Nachtlicht zu einer Artenverschiebung kommen könnte. Entsprechend wird künstliches Nachtlicht in naturnahen aquatischen Ökosystemen als erheblicher Eingriff auf Wasserinsekten qualifiziert.

Der Einfluss von künstlichem Licht bei Stehgewässern kann zu Verschiebungen der Vertikalwanderungen des Zooplanktons führen (vgl. Kapitel *Lichtabhängige Vertikalwanderung des Zooplanktons*, S. 23). Ob dies Auswirkungen auf die ganze Lebensgemeinschaft hat, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden.

Einige Amphibienarten lassen sich von Licht anziehen, andere meiden Licht. Die Nahrungsaufnahme bestimmter Arten kann eingeschränkt sein (vgl. Kapitel *Blendung – Anziehung – Vermeidung von Licht*, S. 28). Zudem wurde verändertes Fortpflanzungsverhalten beobachtet (vgl. Kapitel *Verändertes Fortpflanzungsverhalten*, S. 28). Schnecken sind bei Beleuchtung aktiv, wachsen aber weniger, dafür wird die Eiablage stimuliert.

Beurteilung

Die Auswirkungen von punktuellen Lichtquellen in naturnahen Räumen sind schwierig einzuschätzen. Da naturnahe Räume eine besonders grosse Zahl an Pflanzen und Tieren und auch seltener und gefährdete Arten beherbergen, welche zudem nicht an künstliches Nachtlicht angepasst sind, sind die Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung in diesen Gebieten wahrscheinlich unverhältnismässig grösser als mitten im Siedlungsbereich. Vermutlich sind vor allem Insekten davon betroffen und gerade die seltenen Arten darunter könnten dadurch bedroht werden.

Naturnahen Räumen mit grosser Artenvielfalt muss daher besonders Sorge getragen werden und jeder Einsatz von künstlicher Beleuchtung in solchen Räumen und in ihrer Umgebung (Einflussbereich von 50 m) muss entsprechend sorgfältig abgeklärt werden. Naturschutzgebieten, naturnahen Hanglagen und aquatischen Ökosystemen müssen dabei speziell Beachtung geschenkt werden. Die bestehenden Naturschutzinventare sind bei der Beurteilung angemessen einzubeziehen. Die Beurteilung der Umweltverträglichkeit muss vor Ort und unter Berücksichtigung von potentiellen und bekannten Arten stattfinden. Besonders wichtig wäre ein Schutz vor künstlichem Licht in Gebieten mit reicher Insektenfauna und bei naturnahen aquatischen Lebensräumen.

Gesetzliche Grundlagen für eine umweltverträgliche Beleuchtungspraxis bei naturnahen Gebieten bestehen in vielfältiger Form (vgl. Anhang, S. 76).

Hochhäuser, Hochkamine

Unter diesem Kapitel wird lediglich die Auswirkung auf Vögel im Zusammenhang mit künstlicher Beleuchtung an oder in diesen Objekten ausgeführt, da die unmittelbaren Effekte auf diese Tiere am besten belegt sind. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass die nächtliche Innen- oder Aussenbeleuchtung in herausragenden Hochhäusern zu dekorativen oder Werbezwecken im Sommer auch hochgradige Anlockfallen für hochfliegende Insekten wie Nachtfalter sind (Scheibe 2000).

Auswirkungen beleuchteter Hochhäuser und Vogeltod

Innen- oder Aussenbeleuchtung von Hochhäusern kann für Vögel eine unmittelbare Gefahr bedeuten, da sie sich im Licht dieser Strukturen «verfangen» können, was Tod durch Kollision zur Folge haben kann (vgl. Kapitel *Kollision mit erleuchteten Wolkenkratzern*, S. 31). Tausende von Vögeln gehen in Nordamerika alljährlich auf ihrem Zug an erleuchteten hohen Gebäuden (Wolkenkratzern) zu Grunde. Dies geschieht vorwiegend bei bestimmten Wetterbedingungen wie Nebel oder niedriger Wolkendecke. Da man die toten Vögel nicht an einem Haufen entdeckt, wird dieses Problem im Allgemeinen leicht übersehen (Kousky 2004).

Umweltorganisationen von Amerika und Kanada versuchen in ihren Ländern auf diese Ereignisse Einfluss zu gewinnen. Die BewohnerInnen und EigentümerInnen der oberen Stockwerke werden gebeten, mindestens während des herbstlichen Vogelzugs jeden Abend nach 23 Uhr und bis zur Morgendämmerung die Beleuchtung zu dekorativen oder Reklamezwecken ganz auszulöschen oder zu senken und auch die Innenbeleuchtungen zu dämpfen. Diese Massnahmen sollen für alle Gebäude mit 40 oder mehr Stockwerken gelten und für Gebäude mit 20 Stockwerken, welche isoliert von anderen hohen Gebäuden stehen. Mit solchen Massnahmen konnte die Zahl der toten Vögel in Versuchsarealen um 80 % gesenkt werden (Kousky 2004, The Field Museum 2002). Für niedrige Gebäude mit grosser Glasfront auf der Gewässer-/Meerseite wird empfohlen, während der Zugzeiten Innen- und Aussenbeleuchtung nach 1 Uhr morgens bis zur Morgendämmerung auszuschalten oder die Vorhänge zu ziehen, bzw. die Läden zu schliessen (Kousky 2004).

In den nordamerikanischen Grosstädten Chicago und Toronto ist das «Verdunkeln» bereits seit längerem üblich. In New York wird seit 2005 aufgerufen, diesen Empfehlungen Folge zu leisten (New York City Audubon 2006, Tages-Anzeiger Online 2005): Ab Ende September lagen markante Gebäude im Dunkeln.

Auswirkungen beleuchteter Hochkamine und Vogeltod

Unter gleichen Wetterumständen wie bei Hochhäusern können in der relativ kleinen Lichtsphäre von zur Flugsicherung beleuchteten hohen Strukturen wie Fernmeldetürmen, Hochkaminen und Leuchttürmen Hunderte von Vögeln zu Tode kommen (vgl. Kapitel *Towerkill*, S. 30). Dabei reicht auch schon eine geringe Höhe der Struktur. Bsp.: Bei einem nur 128m hohen Fernsehturm kamen in einer einzigen nebligen Nacht 10 000 Vögel um (Science A Go Go 1999).

Blinkendes oder pulsierendes Licht scheint im Gegensatz zu konstantem Licht durch die Lichtunterbrechung einem Teil der im Licht gefangenen Vögel das Entweichen zu ermöglichen (vgl. Kapitel *Towerkill*, S. 30, Shire 2000). Die Wirkung von Abwehrgeräuschen zusätzlich zu blinkendem Licht ist noch wenig untersucht und ist ausserdem nur in ruhigen Gegenden angesagt (Ogden 1996).

Nachtzug von Vögeln im schweizerischen Mittelland

Der herbstliche Nachtzug der Singvögel verteilt sich im Gebiet von Zürich auf einer breiten Zugbahn. Bei schwachen Winden oder Winden aus Nordost zeigen die Vögel, die in mittlerer Höhe fliegen, Richtungen um 225°, d. h. SW. Die meisten Vögel gleichen ihre Richtung in der Nähe der Alpen dem Alpenbogen an. Bei Winden aus West oder Nordwest wird die Mehrheit der Vögel südwärts (SSW) verdriftet, bis sie zum Alpenrand gelangt. Die Hauptmasse fliegt unter solchen Windbedingungen auf geringer Höhe, d. h. unter 1000 Meter über dem Flachland (Bruderer & Jenni 1998). Im Mittel finden im schweizerischen Mittelland 15 – 25 % des Nachtzuges in den untersten 200 Metern über Boden statt, also im Bereich von Hochkaminen und Hochhäusern (Bruderer & Liechti 2004). Bei Rückenwind können in einer Zugnacht auf einer Breite von einem Kilometer bis zu 10 000 Vögel in einer Stunde durchfliegen (Bruderer & Jenny 1988).

Beurteilung

Hochhäuser erreichen in der Schweiz nicht die Höhe der Bürotürme in Amerika und Kanada. Das höchste Hochhaus von Zürich ist die Hardau, die mit 92 m Höhe angegeben wird. In Planung steht der Prime Tower (ehem. Maagtower), der mit 126 m der höchste Turm der Schweiz werden soll. In Zürich stehen die Hochhäuser einzeln (Hardau, Swissôtel, Sunrise etc.), was bei Beleuchtung eine Auswirkung auf Zugvögel vermutlich eher verstärken würde (vgl. Kapitel *Auswirkungen beleuchteter Hochhäuser und Vogeltod*, S. 47). Es ist nicht bekannt, wie viele Vögel durch die erleuchteten Fenster dieser Hochhäuser umkommen. Da nächtliches Brennenlassen von Gebäudeinnenbeleuchtungen und Anleuchten zu Dekorationszwecken, wenn überhaupt, eher zur Weihnachtszeit stattfindet, ist sie keine vergleichbare Gefahr für nachts ziehende Vögel wie oben für Amerika geschildert.

Hochkamine überschreiten bei uns wie Fernmeldetürme oder Windkraftanlagen ebenfalls selten 100 Meter, was jedoch nicht hindert, dass sie zu Todesfallen für Vögel werden können, wenn sie entsprechend beleuchtet sind und bestimmte meteorologische Verhältnisse herrschen (vgl. oben und Kapitel *Towerkill*, S. 30).

Es ist anzunehmen, dass die potentielle Auswirkung von angestrahlten und erleuchteten hohen Strukturen auf Vögel im Herbst am grössten ist (Vogelzug, Nebel).

Gebäude, Einzelobjekte

Unter diesem Kapitel ist der Fokus auf öffentliche Gebäude und Einzelobjekte gerichtet, historisch interessante Bauwerke oder Stätten (z. B. Denkmäler), die als Wahrzeichen einer Stadt angeleuchtet oder sonst zu dekorativen Zwecken von innen oder aussen beleuchtet werden. Für nicht öffentliche angeleuchtete Gebäude oder grosse Leuchtreklamen gilt selbstverständlich Ähnliches.

Auswirkungen angestrahlter oder beleuchteter Gebäude

Dass mit Licht angestrahlte Einzelgebäude in der Landschaft für Zugvögel zum Verhängnis werden können, ist bekannt. Bsp.: Ornithologen aus Deutschland berichten von einer Notlandung von 2000 Kranichen, die vom Flutlicht zur Beleuchtung einer Burgruine angezogen wurden. Mehrere verwirrte Tiere flogen gegen die Mauern und starben (Klaus 2005). Über im Flutlicht von Gebäuden und Arealen umgekommene Zugvögel gibt es eine grosse Anzahl von Beispielen (Trapp 1998, vgl. Kapitel *Zugvögel in der Lichtsphäre von kleineren beleuchteten Arealen*, S. 30).

Nicht untersucht ist die Wirkung von Beleuchtung auf am Gebäude brütende Vögel. Da Vögel Licht sogar durch ihre Schädeldecke aufnehmen können, kann eine negative Wirkung nicht völlig ausgeschlossen werden (vgl. Kapitel *Lichtdurchlässige Schädeldecke bei Vögeln*, S. 24).

Für Fledermäuse, die im Dachstock oder in Spalten von Gebäuden leben, kann Beleuchtung oder das Anleuchten ihres Quartiers auf der Ausflugsseite schwer wiegende Folge haben. Beispiele dazu gibt es in der Schweiz mehrere (vgl. Kapitel *Fassadenbeleuchtung – eine Bedrohung für Fledermäuse?*, S. 34). Eine Beleuchtung hat besonders beim Ausflug am Abend und beim Schwärmen vor dem Quartier bei der Rückkehr von der Jagd am Morgen die grösste Auswirkung. Allerdings fliegen die Fledermäuse in der Nacht oft mehrmals ein und aus, wenn sie zum Säugen ins Quartier zurückkehren. Da diese Fledermäuse im Winter andernorts ihren Winterschlaf verbringen, beschränkt sich eine Auswirkung der Beleuchtung des Quartiers auf die Monate April bis Oktober.

Lichtquellen sind immer auch Anziehungspunkte für Insekten, die dadurch in ihrem Lebenslauf beeinträchtigt werden (vgl. Kapitel *Anziehung von Fluginsekten*, S. 25 und folgende). Dies gilt auch bei angestrahlten Gebäuden, anderen Einzelobjekten und Leuchtreklamen. Allerdings vermag sich da der Lichtstrahl im Allgemeinen nur auf einer begrenzten Seite auszubreiten.

Die BewohnerInnen der umliegenden Häuser können von der Beleuchtung ebenfalls betroffen sein, da Licht Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen haben kann (vgl. Kapitel *Nachtlicht und menschliche Gesundheit*, S. 38).

Beurteilung

Für die Auswirkung der Beleuchtung von Gebäuden und Einzelobjekten ist die Art der Anstrahlung massgeblich. Anstrahlung mit starkem weissem Scheinwerferlicht aus Distanz (Flutlicht) hat eine unvergleichlich stärkere Auswirkung als dezente Anstrahlung direkt am Objekt. Die Beleuchtung von Gebäuden und Einzelobjekten wird nachfolgend im Zusammenhang mit den Tierklassen diskutiert, für welche sie sich auswirken könnte.

Angeleuchtete Bauwerke können auf Insekten während des Sommers und für ziehende Vögel im Herbst Auswirkungen haben. Dabei sind verschiedene Gesichtspunkte entscheidend:

- Standort: Exponiert auf einem Hügel oder neben einer offenen Fläche wie zum Beispiel am Seeufer, am Siedlungsrand oder am Waldrand hat Beleuchtung eine grössere Auswirkung als an einem niedrigen Landschaftspunkt und inmitten anderer, etwa gleich hoher Gebäude.
- Bauhöhe des beleuchteten Gebäudeteils im Vergleich zu den umliegenden Häusern: Höher als die umgebenden Gebäude hat grössere Auswirkung als niedriger.
- Art der Beleuchtung: Installationsstandort, Ausrichtung, Abschirmung, Leuchten- und Lampentyp, Leuchtmittel.

Gebäude werden von Vögeln zur Reproduktion bewohnt. Darunter sind einerseits Allergensarten wie Stadttauben und Hausspatzen, andererseits schutzwürdige Vögel wie Falken, Dohlen, Segler und Schwalben. Entsprechend müssen auch eventuelle Auswirkungen durch das Anstrahlen von Gebäuden mit Licht bewertet werden. Die Auswirkungen beschränken sich auf die Brutzeit der Vögel von Frühling bis Sommer.

Bei Säugetieren reagieren Fledermausarten, die in Estrichen und Spalten von Gebäuden wohnen, empfindlich auf Anstrahlen ihres Quartiers mit Licht und auf starke Lichtreize. Unter den «Hausfledermäusen» sind auch stark gefährdete und vom Aussterben bedrohte Arten. Da Gebäudequartiere nur im Frühling bis zum Herbst von Fledermäusen bewohnt werden, beschränkt sich die Auswirkung von Beleuchtungen auf diese Zeit. Unter den Säugetieren seien auch die Menschen erwähnt, die durch die Anstrahlung von Gebäuden in der unmittelbaren Nachbarschaft in ihrer Nachtruhe und Regeneration gestört werden können.

Brücken

Verschiedene Beweggründe führen dazu, dass Brücken beleuchtet werden. Mit Licht von oben oder vom Geländer her werden Strassenbrücken und Fussgängerstege zur Verkehrssicherheit und zur Sicherheit der Passanten beleuchtet. Brücken werden dekorativ als Baudenkmäler oder Wahrzeichen angestrahlt. Künstlerische Beleuchtungsinstallationen an Brücken können als visuelle Gestaltungselemente zur Charakterisierung einer Stadtlandschaft beitragen.

Auswirkungen beleuchteter Brücken auf Vögel

Als Beispiel für eine dekorative künstlerische Brückenbeleuchtung sei die mächtige Vincent Thomas Bridge in Los Angeles angeführt, wo 160 Lampen mit je 360 LEDs die Konturen der Brücke (ca. 750 m lang) und die beiden Türme (ca. 100 m hoch) beleuchten (The Port of Los Angeles). Bei der Planung der Beleuchtung hatten Umweltorganisationen Einspruch erhoben, da durch ursprünglich geplantes helles Flutlicht und Licht von Skytrackern erhebliche negative Auswirkungen auf Zugvögel befürchtet wurden (The Urban Wildlands Group 2000, California Coastal Commission 2003). Das Projekt wurde zur umweltverträglicheren Variante abgeändert und die Lichter werden nun nach Mitternacht gelöscht.

Aus der Literatur sind keine konkreten Untersuchungen über die Auswirkungen von beleuchteten Brücken auf Vögel bekannt (California Coastal Commission 2003). Da die Opfer nach einer Kollision mit diesen Strukturen sofort von den Wasserfluten verschlungen und weggetragen würden, wären solche Vorkommnisse auch nicht augenfällig.

Auswirkungen beleuchteter Brücken auf Wasserinsekten und Fische

Licht von Strassenleuchten an Bachufern vermag in den Sommermonaten in grossem Mass fliegende Wasserinsekten anzuziehen (vgl. Kapitel *Anlockwirkung auf Wasserinsekten*, S. 25). Es ist anzunehmen, dass Beleuchtung bei oder auf einer Brücke eine ähnliche Anlockwirkung hat, obwohl dazu keine Untersuchungen gefunden wurden. Verschiedene Insektenarten lassen sich in verschiedenem Masse durch Licht anziehen, weshalb längerfristig eine Artenverschiebung befürchtet wird (vgl. Kapitel *Auswirkungen von künstlichem Nachtlicht auf Lebensgemeinschaften und bedrohte Arten*, S. 42). Das Mass der Anziehung hängt von der Lichtqualität ab (vgl. Kapitel *Lichtqualität*, S. 56).

Auf bestimmte Fische hat Licht eine Anlockwirkung, während andere Licht meiden (vgl. Kapitel *Künstliche Beleuchtung als Leitsignal*, S. 27). Da das Licht der Beleuchtung von Brücken jedoch nicht direkt auf das Wasser gerichtet wird, ist dieser Einfluss wohl eher gering, doch auch da wurden keine spezifischen Untersuchungen gefunden.

Beurteilung

Brücken werden je nach Grösse und Zweck zur Sicherheit von Verkehr und Passanten unterschiedlich beleuchtet. Vor allem in Innenstädten wird auch mancherorts die Konstruktion der Brücke, z. B. das Mauerwerk, angestrahlt. Es ist anzunehmen, dass jede Brückenbeleuchtung je nach Lage, Länge, Breite, Beleuchtung etc. eine andere ökologische Auswirkung haben kann.

Die Brücken liegen bei uns grösstenteils an niedrigen Punkten der Landschaft. Die Kollisionsgefahr für ziehende Vögel ist somit gering. Die Attraktion für nachtaktive Insekten wird bei Brückenbeleuchtung eher grösser sein als bei einer vergleichbar ausgeleuchteten Strasse zwischen Gebäuden oder am Ufer, da das Licht über der offenen Wasseroberfläche über grössere Distanzen sichtbar ist und die Anlockwirkung entsprechend weiter reicht. Zudem kommen zu den terrestrischen noch aquatische Insekten, die in hohem Mass von Beleuchtung angezogen werden.

Die Anstrahlung von Brücken zu dekorativen Zwecken sollte in Anbetracht der verstärkten Anlockung von Insekten besonders kritisch auf ihre Notwendigkeit überprüft werden.

Skybeamer, Laseranlagen

Skybeamer (bzw. Skytracker, Laserscheinwerfer) sind besonders starke Projektionscheinwerfer, die meist zu Werbezwecken, z. B. von Diskotheken, betrieben oder als Wegweiser zu Anlässen verwendet werden. Das Licht wird dabei nach oben in den Nachthimmel abgestrahlt, manchmal als besonders auffällige, rotierende Bündel von Lichtstrahlen.

Je nach Konstruktion werden verschiedene Effekte erreicht: Mehrere drehbare Lampen verursachen rotierendes Licht und Reflektoren lenken das Licht ab. Die Leistung der Lampen kann 4000 – 7000 Watt betragen. Das Licht von Skybeamern kann bis zu 30 km weit beobachtet werden. Die Lichteffekte, die bei bestimmten meteorologischen Verhältnissen durch Reflexion an den Wolken entstehen und auf weitere Distanzen beobachtet werden können, werden manchmal als Ufos interpretiert, was schon zahlreiche Polizeieinsätze ausgelöst haben soll.

Auswirkungen von Skybeamern

Skybeamer haben ungesteuerte visuelle Effekte über beträchtliche Distanzen hinweg. Ein grosser Teil der Bevölkerung empfindet sie als Belästigung und als Lichtverschmutzung.

Direkte negative Auswirkungen von Skybeamern auf die natürliche Umgebung sind schwer nachzuweisen. Es gibt jedoch Hinweise, dass sie auf Tiere negative Auswirkungen haben können. So können starke Lichtquellen, die auf Fledermausquartiere strahlen, schwer wiegende Folgen haben (vgl. Kapitel *Fassadenbeleuchtung – eine Bedrohung für Fledermäuse?*, S. 34). Nachts ziehende Vögel zeigen Schreckreaktionen, wenn sie in den Lichtstrahl einfliegen und wechseln ihre Flugrichtung (vgl. Kapitel *Reaktion auf plötzliche Lichtreize*, S. 32).

Bsp.: Wie massiv das Licht von Skybeamern Vögel durcheinander bringen kann, zeigte sich im Herbst 1996 in einem Landkreis in Deutschland: Ein durchziehender Kranichschwarm war von den Skybeamern so verwirrt, dass die Vögel stundenlang orientierungslos kreisten und schliesslich erschöpft in den Vorgärten landeten. Auch Hunderte Kleinvögel wurden flugunfähig oder tot in den Gärten gefunden (Wüthrich 2001). Bsp.: In einer warmen Nacht wurde beobachtet, dass während einer Stunde etwa 1000 Nachtfalter und andere grössere Fluginsekten an einem Skybeamer verbrannten (Bund 2005).

Verbote von Skybeamern

In Deutschland wurde der Betrieb verschiedener Skybeamer behördlich untersagt. Hierzu existieren mehrere Gerichtsurteile. Als Begründung wurde angeführt, ein Skybeamer sei eine Werbeanlage und falle unter die entsprechenden Gesetze. Er entfalte seine Werbewirkung überall dort, wo der Lichtstrahl sichtbar werde. Da die Lichtstrahlen über den bebauten Ortsteil hinausreichen würden, befinde sich die Werbeanlage zu einem erheblichen Teil im Aussenbereich. Aus Gründen des Landschaftsschutzes und wegen des Ruhe- und Erholungsbedürfnisses der Bevölkerung seien Werbeanlagen und eben auch Himmelsstrahler im Aussenbereich aber grundsätzlich unzulässig. Der Hessische Hotel- und Gaststättenverband hat sich in einer freiwilligen Vereinbarung verpflichtet, künftig immer im Oktober und November die Skybeamer über Hessens Diskotheken auszuschalten.

In der Tschechischen Republik besteht ein nationales Gesetz, dass Licht nicht an den Himmel gestrahlt werden darf. Regionale Einschränkungen bestehen z. B. auf den Kanarischen Inseln, in Katalonien und in der Lombardei.

In der Schweiz sind zur Zeit die Gemeinden für die Bewilligung von Scheinwerferanlagen (Skybeamer, Laser) zuständig. Entsprechende Artikel des eidgenössischen Umweltschutzgesetzes und des Jagdgesetzes besagen, dass Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen *schädliche oder lästige Einwirkungen zu schützen sind* und dass im Sinne der Vorsorge Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, *frühzeitig zu begrenzen* sind (genauer Wortlaut vgl. Anhang). In der Schweiz sind Skybeamer lediglich im Kanton Luzern, in Burgdorf BE und in Ormalingen BL verboten.

Beurteilung

Da die Auswirkungen von Skybeamern auf die Tiere bis heute nicht wissenschaftlich untersucht worden sind, besteht ein grosser Spielraum für die Interpretationen, wie schwer wiegend sie sein mögen. Skybeamer verursachen Lichtemissionen einzig für Reklamezwecke. Sie liegen lediglich im Interesse einer kleinen Minderheit und beziehen sich auf einen bestimmten Anlass und eine bestimmte Örtlichkeit. Dazu stehen ihre Distanzwirkung und der unnötig betroffene Teil der Bevölkerung in keinem Verhältnis. Das Licht von Skybeamern widerspricht dem Ruhe- und Erholungsbedürfnis eines grossen Teils der Bevölkerung. Es ist zu vermuten, dass der langfristige Einsatz von Skybeamern die Gesundheit von Tieren und Menschen in der Umgebung beeinträchtigen würde.

Da bei den ausführlicheren Empfehlungen (Kapitel *Grundsätze und Empfehlungen*, S. 60) nicht mehr ausdrücklich auf den Spezialfall von Skybeamern eingegangen wird, sind die Empfehlungen betreffend Skybeamer hier angeführt. Für eine allfällige Bewilligung sollten mindestens folgende Punkte gelten:

- Die Bewilligungen von Skybeamern dürfen nur in Ausnahmefällen und nur über kurze und begrenzte Zeitdauer von einzelnen Nächten erteilt werden (Regeneration aller Organismen).
- Am Rand und ausserhalb des Siedlungsgebietes, wo empfindliche Landschaftsgebiete und Lebensräume gestört werden könnten, müssen Skybeamer und Laseranlagen verboten sein.
- In der Nähe von bedeutenden Fledermauskolonien (5 km Radius) müssen Skybeamer und Laseranlagen von Mai bis August verboten sein.
- Während der Hauptzugzeiten der Vögel in den Monaten März bis Mai und August bis November dürfen grundsätzlich keine Bewilligungen für Skybeamer erteilt werden.

Strassen als lineare Lichtelemente

Beleuchtete Strassen sind lineare Beleuchtungsstrukturen, welche die Nachtlandschaft zerschneiden. Die Wirkung dieser Zerschneidung ist in dunklen Räumen durch die grosse Kontrastwirkung grösser, als wenn auch die ganze Umgebung beleuchtet wird. Die öffentliche Beleuchtung brennt in Zürich durchgehend. Die so genannte «Ganznacht-Schaltung» erlaubt den Aufbau eines technisch einfachen Kabelnetzes mit wenigen Schaltelementen und minimalem Wartungsaufwand (EWZ 2001).

Die Trenn- und Barrierewirkung wird vor allem im Zusammenhang mit Insekten und Amphibien diskutiert.

Auswirkungen von linearen Lichtelementen

Die Barrierewirkung von Strassen auf verschiedene Tierarten ist bekannt. Doch die Untersuchungen betreffen ausschliesslich den Einfluss des Verkehrs. Zur Barrierewirkung der linearen Beleuchtung bestehen keine Untersuchungen. Die wahrscheinlichste Auswirkung dürfte auf Tiere stattfinden, die Licht meiden (z. B. Puma, vgl. Kapitel *Lichtscheu*, S. 34) oder auf Tiere, die vom Licht angezogen werden, aber im Verkehr umkommen oder dem Licht nicht mehr zu entweichen vermögen (z. B. Insekten, vgl. Kapitel *Invertebraten [Wirbellose]*, S. 25).

Die Attraktionswirkung einer Strassenlampe (mit UV-Anteil) auf schlüpfende Wasserinsekten des Bachufers reichte durchschnittlich 40 Meter weit (vgl. Kapitel *Anlockwirkung auf Wasserinsekten*, S. 25). Künstliche Lichtquellen können sogar je nach Einfluss verschiedener Wetterfaktoren und der Hintergrundbeleuchtung eine Anziehungskraft auf mehrere hundert Meter entfernte Insekten ausüben (in Scheibe 2000). Bei Nachtfaltern wird von Anlockdistanzen bis 100 oder 200 Metern gesprochen. Beim Abstand der Leuchten von 30 bis 50 Metern kann eine beleuchtete Strasse daher durch die «Staubsaugerwirkung» des Lichts für viele nachtaktive Insekten sehr wohl eine Barriere darstellen, die kaum überwunden werden kann. Über die Auswirkungen dieser Lebensraumzerschneidung auf die Insektenpopulationen fehlen bisher Untersuchungen.

Bei Amphibien (z. B. Salamander) wird ebenfalls vermutet, dass Wanderungen durch Lichteinflüsse verhindert werden könnten (Wise & Buchanan 2002), doch sind dazu kaum Untersuchungen vorhanden.

Auch bei lichtscheuen Fledermäusen bestehen Vermutungen, dass kontinuierliche Beleuchtungen entlang von Strassen nicht überquert werden. Bsp.: Wasserfledermäuse *Myotis daubentonii* vermeiden es beispielsweise, ihre Flugrouten entlang von beleuchteten Strassen zu wählen (Jones 2000).

Beurteilung

Da keine Untersuchungen über die Barrierewirkungen von linearen Lichtelementen vorliegen, ist eine Beurteilung unmöglich. Die wahrscheinlichste Barrierewirkung durch Licht ist ausserhalb des Siedlungsbereichs zu erwarten und betrifft wohl die Insekten. Werden Strassen in solchen Gebieten beleuchtet, muss daher verstärkt auf den Einsatz von insektenfreundlichen Leuchten und Lampentypen geachtet werden.

6 UMWELTVERTRÄGLICHE BELEUCHTUNG

Für eine umweltverträgliche Beleuchtung sind die drei Grössen aus der Definition von Kobler (2003) (vgl. Kapitel *Einführung*, S. 11) massgebend: die Qualität, die Quantität und die Richtung der emittierten Strahlung. Die Lichtqualität hat die grösste Bedeutung für die Auswirkung auf Organismen und hängt im Wesentlichen von der spektralen Zusammensetzung des Lichts und damit vom Lampentyp ab. Die Lichtquantität wird durch die Anzahl und Ausrichtung der Leuchten, die Beleuchtungsstärke und die Leuchtdichte bestimmt.

Im Folgenden werden die Lichtqualität und Lichtquantität diskutiert und die gebräuchlichsten Lampen einer Beurteilung unterzogen. Im anschliessenden Kapitel werden Grundsätze und Empfehlungen für eine umweltverträglichere Beleuchtung im Aussenbereich formuliert. Eine Checkliste für Abklärungen zu umweltverträglichen Beleuchtungen ist am Schluss angefügt.

Lichtqualität

Kriterien zur Wahl der Lampentypen

Eines der Kriterien für die Auswahl des Lichts ist heute die Wirtschaftlichkeit. Betriebskosten (Energieverbrauch, Lebensdauer der Lampe, Auswechseln der Leuchten) sowie Anschaffungskosten werden dabei in Rechnung gezogen (Homepage ewz, Piller 2004). Entsprechend wurden mit dem Ersetzen von Quecksilberdampf-Hochdrucklampen durch Natriumdampf-Hochdrucklampen Kosteneinsparungen gemacht.

Die Verkehrs- und Fussgängersicherheit als zweites wichtiges Kriterium hängt unter anderem von der Lichtqualität ab. Für die Verkehrssicherheit bringen hauptsächlich Lampen mit tageslichtähnlichem Licht zwei Vorteile: Die Farbwiedergabe ist besser und die Automobilisten bleiben bei tageslichtähnlicher Verkehrsbeleuchtung eher wach.

Anforderungen an die örtlichen Verhältnisse (Normen SN der Schweizer Licht Gesellschaft SLG) sind weitere Kriterien für die Wahl des eingesetzten Lichts.

Die Auswirkungen der Lichtqualität auf Organismen, seien es Pflanzen, Tiere oder Menschen, fanden bis anhin kaum Berücksichtigung bei der Wahl der Lampentypen (vgl. Tab. 3). Für die Auswirkung der künstlichen Beleuchtung auf Organismen ist ebenfalls die spektrale Zusammensetzung des ausgestrahlten Lichts massgebend (vgl. Kapitel *Auswirkungen der Lichtqualität*, S. 15). Aus ökologischer Sicht gilt folgendes Hauptkriterium, das beim Einsatz von Beleuchtung berücksichtigt werden sollte:

- Je geringer der Blau- und Ultraviolett-Anteil am Spektrum des ausgestrahlten Lichts, desto kleiner sind im Allgemeinen die negativen Auswirkungen auf die Organismen.

Umweltverträglichkeit verschiedener Lampentypen bezüglich ihrer spektralen Zusammensetzung

Lampen können grob den beiden Einteilungen «Weisslichtlampen» oder «Gelblichtlampen» zugeordnet werden. Das Licht der «Weisslichtlampen» setzt sich aus Wellenlängen des gesamten sichtbaren Spektrums zusammen. Je nach verwendetem Gasgemisch und Leuchtstoff (Beschichtung auf der Innenseite) der Lampe weist das Spektrum unterschiedliche Maxima in den verschiedenen Farbbereichen auf. Entsprechend dem Anteil dieser verschiedenen Wellenlängen werden die Weisslichtlampen unterteilt in warmweiss (Rotanteil höher), neutralweiss und tageslichtweiss (Blauanteil höher). Charakterisiert wird das weisse Licht durch die Farbtemperatur in Kelvin (K): warmweiss (< 3300 K), neutralweiss (3300 – 5000 K), tageslichtweiss (> 5000 K).

In der nachfolgenden Zusammenstellung sind vier Lampentypen nach ihrer Anlockwirkung auf Insekten in aufsteigender Reihenfolge angeführt (Schanowski 2000). Am wenigsten Anlockwirkung zeigt die rein gelbe Natriumdampf-Niederdrucklampe, am meisten die Quecksilber-Hochdrucklampe (vgl. Tab. 3):

Natriumdampf-Niederdrucklampe (LST)

Die «LST» strahlt die gesamte Energie im Bereich von ca. 590 nm aus («Gelblichtlampe»). Einzige Lampenart, die kein Quecksilber enthält. Ihr monochromatisches Licht erschwert allerdings das Erkennen von Farben und sie wird deshalb wenig eingesetzt (Piller 2004).

Natriumdampf-Hochdrucklampe (HST oder HSE)

Das Spektrum der «HSE» strahlt die Hauptenergie im gelben Bereich von ca. 570 bis 630 nm ab («Gelblichtlampe»). Kurzwellige Strahlen (UV) werden nur in sehr geringem Umfang ausgesandt. Die «HSE» ermöglicht das Erkennen von Farben, die Farbwiedergabe ist jedoch beschränkt. Natriumdampf-Hochdrucklampen sind in der Anschaffung etwas teurer, brauchen jedoch wesentlich weniger Strom. Sie haben pro Watt eine doppelt bis dreimal so hohe Lichtausbeute wie Quecksilberdampf-Hochdrucklampen. Die jährliche Kosteneinsparung wird auf ca. 57 % berechnet (Schanowski 2000?). Für bestimmte Arten von Wasserinsekten, Nachtfalter und Glühwürmchen bieten «HSE» keinen hinreichenden Schutz.

Leuchtstofflampe (T-Lampe) und Kompakt-Leuchtstofflampe (TC, «Energiesparlampe»)

Diese beiden Typen haben ebenfalls ein recht breites Lichtspektrum («Weisslichtlampe»), wobei die Hauptenergiemenge im grünen und orangefarbenen Bereich liegt, was auf dem Emissionsspektrum des in allen Leuchtstoffröhren enthaltenen Phosphors beruht. Im kurzwelligen Bereich wird nur wenig Energie abgestrahlt. Neuere Kompakt-Leuchtstofflampen sind dimmbar, was in Nachtzeiten mit geringer Verkehrsdichte von Vorteil sein kann. Werden Betriebsdauer, Stromkosten und Wartung einbezogen, sind Leuchtstofflampen eher teuer (Piller 2004).

Quecksilberdampf-Hochdrucklampe (HME)

Die «HME» strahlt in einem breiten Spektralbereich (ca. 320–720 nm) Energie ab («Weisslichtlampe»). Sie hat ein Strahlungsmaximum etwa zwischen 540–620 nm, ein weiteres zwischen 400 und 440 nm. Besonders attraktiv für nachtaktive Insekten ist der Bereich der sichtbaren kurzwelligen Strahlung, wobei die maximale Wirkung bei 410 nm zu liegen scheint. Gerade in diesem Bereich strahlt die «HME» grosse Energiemengen ab. Die Farbwiedergabe ist nur wenig besser als bei Natriumdampflampen. Die «HME» ist auch von anderen Gesichtspunkten her (Energieverbrauch, Entsorgung) die umweltschädlichste Lampe. In der Schweiz werden die unwirtschaftlichen «HME» heute kaum mehr bei Neuanlagen verwendet und die noch vorhandenen werden laufend durch andere Lampentypen ersetzt. Das Ziel bei den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich (EKZ) ist der Ersatz von 1000 Stück Quecksilberdampflampen pro Jahr durch Natriumdampf-Hochdrucklampen (Homepage EKZ, 15.08.05).

Über die folgenden Lampentypen sind keine Untersuchungen über die Anlockwirkung auf Insekten bekannt. Doch gilt auch da, dass Lampen mit hohem Blauanteil im Allgemeinen eine grössere Wirkung zeigen. Diese Lampentypen sind in der Stadt Zürich weniger von Belang (vgl. Tab. 5 im Anhang):

- *Glühlampe* («Weisslichtlampe») mit Farbtemperatur um 2800 K (warmweiss, mit hohem Rotanteil). Auf die Unterdrückung der Melatonin-Produktion beim Menschen hat sie eine weniger grosse Auswirkung als Lampen mit höherem Blauanteil (vgl. Kapitel *Licht blauer Wellenlänge und Melatonin beim Menschen* –
- *Halogen-Metaldampflampe* (Hlx, «Weisslichtlampe») mit besserer Farbwiedergabe als Quecksilberdampf-Hochdrucklampe, ev. kleinerer Einfluss auf Insekten. Je nach Zusammensetzung von Gasgemisch und Leuchtstoff variiert die Farbtemperatur von «Hlx» zwischen 3000 (warmweiss) und 7000 (tageslichtweiss) K. Die möglichen Auswirkungen müssen im Einzelfall aufgrund des genauen Lampentyps bestimmt werden.
- *Induktionslampe* (QL, «Weisslichtlampe») ist eine elektrodlose Leuchtstofflampe, extrem hell und hat eine optimale Lebensdauer. Induktionslampen sind erhältlich in Farbtemperaturen von 2700, 3000 und 4000 Kelvin (warmweiss – neutralweiss).
- *Strassenleuchten mit Leuchtdioden* (*light emitting diodes, LED*): Erste Strassenlampen stehen in den Niederlanden (Löfken 2005). Sie scheinen aber erst in der Entwicklung zu sein (Piller 2004). Es gibt rote, grüne, gelbe, orange, blaue und weisse Leuchtdioden. Sie emittieren Licht in einem begrenzten Spektralbereich, d. h. das Licht ist nahezu monochrom. Weisse LEDs werden entweder aus den Farben Rot, Grün und Blau zusammengeschaltet oder eine blaue LED wird mit einem Fluoreszenzfarbstoff (ähnlich dem Leuchtstoff in der Leuchtstoffröhre) kombiniert und ergibt so weisses Licht. Es gibt LEDs von warmweiss bis tageslichtweiss.

Lichtquantität

Beleuchtungsstärke

Jede künstliche Lichtquelle im Aussenbereich ist potentiell Mitverursacher von Lichtimmissionen und trägt je nach Ausrichtung und Lichtstärke in unterschiedlichem Ausmass dazu bei. Für die öffentliche Beleuchtung sind die Leitsätze als Normen (SN) von der Schweizer Licht Gesellschaft SLG festgehalten und betreffen Strassen, Plätze, Radwege, Fussgängerzonen, Überführungen etc. Die Normen für Strassenbeleuchtungen sind abhängig von der Strassenart (zulässige Geschwindigkeit, Strassenbreite, Helligkeit der Umgebung, Einmündungen etc.) und dem Verkehrsaufkommen und werden als Orientierungsrahmen zur Vermeidung von Schadenersatzansprüchen empfohlen. Kriterien für «gutes Licht» einer Strassenbeleuchtung sind vor allem die Gleichmässigkeit der Beleuchtung und die Blendbegrenzung (vgl. Kapitel *Hell-Dunkel-Adaptation des menschlichen Auges*, S. 16) sowie ein ausreichendes Beleuchtungsniveau. Das nächtliche Abschalten jeder zweiten Leuchte wird wegen der dunklen Zwischenbereiche, während welcher das Auge fast nichts zu erkennen vermag, von Fachleuten verworfen. Als Alternative wird das Absenken des gesamten Beleuchtungsniveaus in Zeiten mit geringem Verkehrsaufkommen empfohlen (Piller 2004).

Bei Beleuchtungen zu dekorativen Zwecken fallen zwingende Anforderungen weg. Entsprechend dezent kann die Beleuchtung gewählt werden.

Leuchtdichte

Das Licht, das beispielsweise von einer Strassenlampe auf den Boden gelangt (Beleuchtungsstärke), wird von diesem je nach Belag zu einem bestimmten Anteil reflektiert. Dieses reflektierte Licht kann ebenfalls gemessen werden (Leuchtdichte). Es stellt einen nicht unerheblichen Anteil an diffusem Licht dar, das den Aussenraum indirekt erhellt und ebenfalls zur Lichtimmission beiträgt. Die Reflexion beträgt bei Asphalt ca. 10 % und bei Beton rund 20 %. Das diffuse Licht kann beispielsweise ausreichen, den Trottoirbereich zu beleuchten. Objekte nimmt man optisch vorwiegend durch reflektiertes Licht wahr. Mit dem entsprechenden dunklen Belag kann zwar eine Abstrahlung verhindert werden, je nach Beleuchtungsziel ist dies jedoch gar nicht erwünscht. Eine Verminderung der Lichtimmission lässt sich deshalb meist nur über Beleuchtungsverzicht und die Minimierung der Beleuchtungsstärke erreichen.

Lichtlenkung

Licht, welches in nicht zu beleuchtende Räume dringt, ist ökologisch besonders fragwürdig. Mit entsprechend sinnvoller Stellung und Ausrichtung von Leuchten und Lampen bzw. mit Anbringen von Lichtlenkungselementen kann die Abstrahlung verhindert und das Licht dorthin gelenkt werden, wo es benötigt wird.

Grundsätze und Empfehlungen

Künstliche Beleuchtung im Aussenbereich ist verschiedensten sich widersprechenden Interessen ausgesetzt. Sicherheitstechnische, psychologische, ästhetische, ökonomische und ökologische Gesichtspunkte müssen bei Abklärungen zu künstlichen Beleuchtungen gegeneinander abgewogen werden.

Eine Einschränkung von Beleuchtung und Reduktion von Lichtimmissionen hat für die Menschen und die Umwelt in verschiedener Hinsicht grosse Vorteile:

- Ökologischer Gewinn: Nächtliches Zeitfenster durch Begrenzung der Beleuchtung ermöglicht Dunkelheit, Ruhe und Regeneration für alle Organismen.
- Ökonomischer Gewinn: Weniger Energieverbrauch und geringere Stromkosten.
- Gestalterischer Gewinn: der gestalterische Einsatz von Kunstlicht profitiert von einer dezenten Beleuchtung.
- Ästhetischer und emotionaler Gewinn: Der ungetrübte Anblick des Sternenhimmels und einer natürlichen Nachtlandschaft fasziniert auch heute viele Menschen.

Die hier zusammengestellten Grundsätze und Empfehlungen für künstliche Beleuchtung sind aus der Beurteilung ihrer Auswirkungen auf Organismen abgeleitet. Energetische, astronomische, ästhetische und psychologische Gesichtspunkte sind nicht einbezogen. Die Empfehlungen folgen im Wesentlichen einem einfachen Hauptprinzip:

«Licht soll nur zu Zeiten eingesetzt werden, wenn es gebraucht wird und nur dorthin gelangen, wo es sinnvoll ist.»

Sie sind in folgende Themen gegliedert:

- Abklärungen über Umweltverträglichkeit
- Lichtimmission allgemein vermindern (vgl. Hauptprinzip)
- Anpassung der Beleuchtung an ökologisch verschiedene Stadtgebiete
- Anpassung der Beleuchtung an die Saison
- Ökologisch verträglichste Beleuchtung einsetzen (Leuchtentyp, Leuchtmittel, Beleuchtungsstärke)
- Forschungsbedarf und Monitoring

Im Anschluss ist eine Übersicht mit den Schwerpunkten als Checkliste angefügt (Tab. 4).

Abklärungen über Umweltverträglichkeit

Vor der Neuinstallation jeder künstlichen Beleuchtung (auch bei Beleuchtungen zu Dekorations- und Reklamezwecken) am Rand oder ausserhalb des Siedlungsbereichs sowie in oder nahe bei sensiblen Räumen innerhalb der Stadt (vgl. unten) muss ihre Umweltverträglichkeit überprüft werden. In diesem Sinne sollten auch die schon bestehenden Beleuchtungsanlagen in solchen Gebieten begutachtet werden, mindestens bei Ersatz der Anlagen oder bei baulichen Änderungen.

- Die Beurteilung der Umweltverträglichkeit muss vor Ort und unter Berücksichtigung von potentiellen und bekannten Arten durch biologische Fachpersonen stattfinden.
- Die bestehenden Naturschutz- und Arteninventare sind bei der Beurteilung angemessen einzubeziehen.
- Durch den Einbezug einer ökologischen Beratung bei der Planung kann die ökologische Bedeutung im Verhältnis zu anderen Interessen gewichtet werden.

Lichtimmission allgemein vermindern

Jede Beleuchtung kann im Prinzip zur Lichtimmission und zur verstärkten Lichtglocke beitragen. Entsprechend zurückhaltend sollte künstliche Beleuchtung eingesetzt werden. Als Zielsetzung sollten folgende Punkte gelten:

- Frage nach der generellen Notwendigkeit: Eine Beleuchtung sollte nur angebracht werden, wenn sie sinnvoll ist. Schmuckbeleuchtungen müssen besonders kritisch hinterfragt werden. Auf den Einsatz von Skybeamern sollte grundsätzlich verzichtet werden.
- Doppelbeleuchtung muss auf jeden Fall vermieden werden, ein Rückbau von überflüssigen Leuchten ist empfehlenswert.
- Zeitliche Begrenzung der Beleuchtung durch Bewegungsmelder oder Zeitschaltungen.
- Licht soll zielgerichtet sein, d. h. nur dorthin gelangen, wo es der Mensch braucht: Keine Beleuchtung Richtung Himmel oder in naturnahe Räume. Sinnvolle Platzierung und Ausrichtung der Leuchten. Vollständige Abschirmung der Lampen gegen nicht zu beleuchtende Räume (Abschirmung, Spiegel, Reflektoren).
- Beleuchtungsstärke aufs Notwendige begrenzen: Innerhalb der Normen zur Verkehrs- und Fussgängersicherheit im öffentlichen Raum nur so stark wie wirklich nötig beleuchten.
- Berücksichtigung der ökologischen Anforderungen bei den Normen (Überarbeitung der bestehenden Normen der Schweizer Licht Gesellschaft SLG!).

Anpassung der Beleuchtung an ökologisch verschiedene Stadtgebiete

Die Auswirkung der Beleuchtung auf Organismen ist in ökologisch sensiblen (naturnahen) Räumen wie beispielsweise am Stadtrand, am Waldrand, an Gewässern, bei Feuchtgebieten oder in anderen Gebieten mit vielfältiger Tier- und Pflanzenwelt am schwer wiegendsten.

- In naturnahen Räumen und ihrem unmittelbaren Einflussbereich von 50 Metern muss jede künstliche Beleuchtung grundsätzlich in Frage gestellt und auf ihre Verträglichkeit von biologischen Fachpersonen geprüft werden (vgl. oben).
- Wo dem Schutz der Biodiversität ein hoher Stellenwert eingeräumt wird, also in und entlang von Naturräumen, dazu gehören die unverbaute Landschaft, Waldränder, die Gewässer, Feuchtgebiete sowie Naturschutzgebiete und andere naturnahe Standorte mit vielfältiger Tier- und Pflanzenwelt, sollte Beleuchtung ganz vermieden werden.

Anpassung der Beleuchtung an die Saison

Für viele Tiere machen sich die negativen Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung hauptsächlich während der warmen Jahreszeit von Frühling bis Herbst bemerkbar, so beispielsweise bei vielen Wirbellosen (Spinnen und Insekten) bei Amphibien, Brutvögeln und Fledermäusen. Bei den nachts ziehenden Vögeln findet der Herbstzug bei uns je nach Art hauptsächlich zwischen August und November mit dem Schwergewicht des Hauptzuges auf September und Oktober statt, der Frühjahrszug zwischen März und Mai, mit Schwergewicht auf März und April. Der Lichtglockeneffekt entsteht bei Nebel oder niedriger Wolkendecke, Wetterlagen also, die bei uns vor allem im Herbst vorkommen. Im Winter sind die negativen Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung wahrscheinlich weniger gross, weshalb die Verwendung von Licht entsprechend dem Bedürfnis der Menschen zu den winterlichen Abendstunden und zu Weihnachten ökologisch weniger schwer wiegende Auswirkungen hat. Aus diesen Überlegungen müssen folgende Einschränkungen von Beleuchtung in Betracht gezogen werden:

- Beschränkung der Beleuchtung von Gebäuden oberhalb der Regelbauweise während den Vogelzugzeiten von März bis Mai und vom August bis November möglichst auf 22 Uhr, spätestens aber auf 24 Uhr.
- Abschalten jeder entbehrlichen Beleuchtung bei niedriger Wolkendecke, Nebel oder anhaltenden Hochnebellagen während der Monate September und Oktober (hauptsächlich Herbstzug der Vögel).
- Abschaltung der Beleuchtung von Gebäuden bzw. Gebäudeteilen mit nistenden schutzwürdigen Vögeln je nach Art zwischen März und August und bei Fledermausquartieren von Mai bis September.

- Beschränkung der Beleuchtung in naturnahen Lebensräumen auf die Wintermonate von Oktober bis März (Insekten, Amphibien).
- Begrenzung von Schmuckbeleuchtung (Beleuchtungen zu Dekorations- und Reklamezwecken) auf die frühen Nachtstunden bis spätestens Mitternacht (Rücksicht auf die Insekten und auf die Nachtruhe und Regeneration der Menschen in der Nachbarschaft, geringe Notwendigkeit).

Ökologisch verträglichste Beleuchtung einsetzen

Wenn nicht auf künstliche Beleuchtung verzichtet werden kann, muss wenn immer möglich die ökologisch verträglichste Beleuchtung gewählt werden. Die Beleuchtung soll dabei im Hinblick auf mögliche negative Auswirkungen auf Organismen ausgewählt und installiert werden. Dem Leuchtentyp, dem Leuchtmittel der Lampen (Lichtfarbe) und der Beleuchtungsstärke (vgl. oben) kommt in dieser Hinsicht besondere Bedeutung zu.

- Leuchten mit begrenztem Abstrahlwinkel und keinesfalls kugelige Leuchten einsetzen. Bei Anstrahlung von Objekten Leuchten sachgerecht am Objekt installieren.
- Abdichtung der Leuchten gegen das Eindringen von Insekten und Spinnen.
- Anteil an kurzwelligem Licht soll möglichst gering sein. Je geringer der Blau- und Ultraviolett-Anteil am Spektrum der Lampe, desto kleiner sind im Allgemeinen die negativen Auswirkungen auf die Organismen.

Forschungsbedarf und Monitoring

- Es besteht weiterhin ein dringender Forschungsbedarf zur Klärung der Auswirkungen und erfolgreicher Schadensbegrenzungsmaßnahmen bezüglich vieler Artengruppen.
- Um die zukünftige Entwicklung der Lichtimmission zu verfolgen wird unbedingt eine Überwachung mittels geeignetem Monitoring empfohlen.

Tab. 4. Matrix: Checkliste für eine umweltverträgliche Beleuchtung

Abklärungen zu Lichtfarbe / Beleuchtungszeit / Raum	Beleuchtung unterlassen (Lichtfarbe anpassen)	Zeitliche Begrenzung der Beleuchtung		Erläuterungen zu den Empfehlungen
		auf bestimmte Jahreszeit	auf bestimmte Nachtstunden	
Abklärungen: ● = notwendig ○ = empfohlen Naturräume: Dazu gehören die unverbaute Landschaft, Waldränder, die Gewässer, Feuchtgebiete sowie Naturschutzgebiete und andere naturnahe Standorte mit vielfältiger Tier- und Pflanzenwelt	●			In sensiblen Landschaftsräumen ist auf die Beleuchtung von Bauwerken und Strukturen zu ästhetischen oder Reklamezwecken zu verzichten. Nutz-beleuchtungen (für Arbeit und Sicherheit) müssen bezüglich Umweltverträglichkeit optimiert sein (d.h. möglichst zielgerichtet und mit angepasster Lichtintensität und Lichtfarbe).
Gebäude, die sensible Tierarten beherbergen: Fledermäuse oder schutzwürdige am oder im Gebäude nistende Vogelarten		●		Die Beleuchtung von Fledermausquartieren oder Lichteffekte, die auf solche Quartiere fallen, müssen von Mai bis September unterlassen werden. Gebäudeteile, die schutzwürdige nistende Vögel wie Falken, Dohlen, Segler oder Schwalben beherbergen, dürfen von März bis August (je nach Art) nicht beleuchtet werden.
Sensibler Standort: Auf Hügel, neben offener Fläche, zum Beispiel schutzwürdige Standorte am Fluss- oder Seeufer, in der unverbauten Landschaft oder am Waldrand		●	●	Bei Bauwerken, die an sensiblen Standorten stehen, sollte wenn immer möglich von einer Beleuchtung abgesehen werden. Falls dies nicht der Fall ist, sollten die Lichtintensität und die Lichtfarbe optimiert werden und die Beleuchtung mindestens von Frühling bis Sommer ab 22 Uhr gelöscht werden.
Nicht sensibler Standort: An niedrigem Landschaftspunkt, inmitten von Gebäuden		○	○	Auch in nicht sensiblen Gebieten empfiehlt es sich, die Beleuchtung von Bauwerken oder sonstigen Strukturen ab 22 Uhr, spätestens ab 24 Uhr abzuschalten, insbesondere aber bei Hochnebeln im September und Oktober.
Überragende Höhe des beleuchteten oder erleuchteten Bauwerks: Höher als die umgebenden Gebäude		●	●	Bei Gebäuden mit mehr als 20 Stockwerken muss die Innenbeleuchtung zu Reklamezwecken von März bis Mai und August bis November möglichst ab 22 Uhr, spätestens ab 24 Uhr unterlassen werden. Die Nutzbeleuchtung (für Sicherheit und Arbeit) soll bezüglich der Umweltverträglichkeit optimiert werden..
Nicht überragende Höhe des beleuchteten oder erleuchteten Bauwerks: Gleich hoch oder niedriger als umgebende Gebäude		○	○	Es empfiehlt sich, die Beleuchtung von Bauwerken oder sonstigen Strukturen möglichst ab 22 Uhr, spätestens ab 24 Uhr abzuschalten, insbesondere aber bei Hochnebeln im September und Oktober.

Informationen, ob Naturräume, sensible Lebensräume oder Arten betroffen sind, und generell Auskünfte zur ökologischen Baubegleitung bei:

Grün Stadt Zürich, Fachstelle Naturschutz, Telefon 044 412 46 22

Grundlagenbericht Lichtimmission, 13. März 2007, SWILD Zürich

7 LITERATUR

Anonymous (1999):

Halibut. VIRTUE Newsletter: Curriculum. UMBI University of Maryland Biotechnology Institute.
http://int.nml.uib.no/virtue/newsletter/00_09/curr-holm/more-info/halibut.php (21. Okt. 05).

Aupinel, P., Bonnet, J. C. (1996):

Influence de la photopériode sur l'activité saisonnière de l'escargot petit-gris (*helix aspersa* Müller).
Effet spécifique sur la croissance et la reproduction. INRA Production Animales 9(1): 79 – 83.

Avery, M., Springer, P. F., Cassel, J. F. (1976):

The effects of a tall tower on nocturnal bird migration – A portable ceilometer study.
Auk 93: 281 – 291.

Beck, A. (2005):

Aargauer Beispiele zur Problematik Fledermäuse/Licht.
Zusammenstellung des Kantonalen Fledermausschutz-Beauftragten des Kantons Aargau.

Beier, P. (1995):

Dispersal of juvenile cougars in fragmented habitat. *Journal of Wildlife Management* 59(2): 228 – 237.

Bergen, F., Abs, M. (1997):

Etho-ecological study of the singing activity of the blue tit (*Parus caeruleus*), great tit (*Parus major*) and chaffinch (*Fringilla coelebs*). *J. Ornithol.* 138: 451 – 67.

Bird, B., Branch, L. C., Miller, D. L. (2004):

Effects of coastal lighting on foraging behavior of beach mice. *Conservation Biology* 18(5): 1435 – 1439.

Blake, D., Hutson, A. M. et al. (1994):

Use of lamplit roads by foraging bats in southern England. *Journal of Zoology* 234(3): 453 – 462.

Briggs, W. R. (2002):

Plant photoreceptors: proteins that perceive information vital for plant development from the light environment (abstract).

The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference).

<http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).

Britschgi, A., Theiler, A., Bontadina, F. (2004):

Wirkungskontrolle von Verbindungsstrukturen, «Heckenexperiment». SWILD, Zürich.
Teilbericht im Auftrag der DEGES, Berlin.

Bruderer, B., Jenni, L. (1988):

Vogelzug. Schweizerische Vogelwarte Sempach. 40 S.

Bruderer, B., Liechti, F. (2004):

Welcher Anteil ziehender Vögel fliegt im Höhenbereich von Windturbinen. *Ornithol. Beob.* 101: 327 – 335.

Bruderer, B., Peter, D. et al. (1999):

Behaviour of migrating birds exposed to X-band radar and a bright light beam. *Journal of Experimental Biology* 202(9): 1015 – 1022.

Bruijs, M.C.M., Hadderingh, R.H., Jenner, H.A. (2002):

Deflecting eels from water intakes with light. *Measuring Behavior: Proceedings of the 4th International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research.*

<http://www.noldus.com/events/mb2002/program/abstracts/bruijs.html> (21. Okt. 05).

Buchanan, B. W. (2002):

Observed and potential effects of artificial light on the behavior, ecology, and evolution of nocturnal frogs (abstract). The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference).
<http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).

Buchanan, B. W. (1993):

Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs. *Animal Behaviour* 45(5): 893 – 899.

Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) e.V. Regionalgeschäftsstelle Südlicher Oberrhein:

<http://vorort.bund.net/suedlicher-oberrhein/projekte/archiv/skybeamer.htm> (21.Okt. 05).

California Coastal Commission (2003):

Staff report: Material amendment.

<http://www.coastal.ca.gov/lb/5-00-384.pdf> (21. Okt. 05).

- Chemineau, P., Malpaux, B., Pelletier, J., Leboeuf, B., Delgadillo, J.A., Deletang, F., Pobel, T., Brice, G. (1996):**
Emploi des implants de mélatonine et des traitements photopériodiques pour maîtriser la reproduction saisonnière chez les ovins et les caprins. *INRA Production Animales* 9(1): 45–60.
- Cochran, W., Graber, R. (1958):**
Attraction of nocturnal migrants by lights on a television tower. *Wilson Bulletin* 70: 378–380.
- Cantor, C. R., Griffith, J. S. (1995):**
Nocturnal emergence of juvenile rainbow trout from winter concealment relative to light intensity. *Hydrobiologia* 299(3): 179–183.
- Cullen, P., McCarthy, T. K. (2000):**
The effects of artificial light on the distribution of catches of Silver eel, *Anguilla anguilla* (L.), across the Killaloe eel weir in the lower River Shannon. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy* 100b(3): 165–169.
- DasErste (2003):**
Nachtschwärmer. *DasErste.de* – W wie Wissen, Sendung vom 2.7.2003. <http://www.daserste.de/wiewissen/thema.asp?id=fx31h9qfsepram3n&cm.asp> (21. Okt. 05).
- Davis, S. (2003):**
Die innere Uhr von Pflanzen. Tätigkeitsbericht 2003, Max-Planck-Gesellschaft.
- De Molenaar, J. G., Jonkers, D. A., Sanders, M. E. (2002):**
Road illumination and black-tailed godwit (abstract). The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference). <http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).
- De Reviers, M. (1996):**
Photopériodisme, développement testiculaire et production de spermatozoïdes chez les oiseaux domestiqueS. *INRA Production Animales* 9(1): 35–44.
- Derrickson, K. C. (1988):**
Variation in repertoire presentation in northern mockingbirdS. *Condor* 90: 592–606.
- Eisenbeis, G. (2002):**
Artificial night lighting and insects in Germany (abstract). The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference). <http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).
- Eisenbeis, G., Hassel, F. (2000):**
Attraction of nocturnal insects to street lights – a study of municipal lighting systems in a rural area of Rheinhessen (Germany). *Natur und Landschaft* 75(4): 145–156.
- EWZ (2001):**
Licht für Zürich. Die öffentliche Beleuchtung. EWZ, Stadt Zürich, Departement der Industriellen Betriebe.
- FLAP (Fatal Light Awareness Program).**
<http://www.flap.org/new/bfbfr.htm> (21. Okt. 05).
- Foster, R. G., Wulff, K. (2005):**
The rhythm of rest and excess. *Nature Reviews, Neuroscience* 6: 407–414.
- Frank, K. D. (2002):**
Impact of artificial lighting on moths (abstract). The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference). <http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).
- Frank, K. D. (1988):**
Impact of outdoor lighting on moths: An assessment. *Journal of the Lepidopterists Society* 42(2): 63–93.
- Gauthreaux, S. Jr., Belser, C. G. (2002):**
The behavioral responses of migrating birds to different lighting systems on tall towers (abstract). The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference). <http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).

- Gorenzel, W. P., Salmon, T. P. (1995):**
 Characteristics of American Crow urban roosts in California. *Journal of Wildlife Management* 59(4): 638–645.
- Gotthard, K. (2000):**
 Increased risk of predation as a cost of high growth rate: An experimental test in a butterfly. *Journal of Animal Ecology* 69(5): 896–902.
- Graber, R. R. (1968):**
 Nocturnal migration in Illinois – Different points of view. *Wilson Bulletin* 80: 36–71.
- Guillaume, D. (1999):**
 Effet de la saison, de l'éclairage artificiel et de la mélatonine sur le rythme annuel de reproduction de la jument. *INRA Production Animales* 12: 332–334.
- Guillaume, D. (1996):**
 Action de la photopériode sur la reproduction des équidés. *INRA Production Animales* 9(1): 61–69.
- Guynup, S. (2003):**
 Light pollution taking toll on wildlife, Eco-Group say. *National Geographic today*.
 National Geographic News. http://news.nationalgeographic.com/news/2003/04/0417_030417_tvlightpollution.html (21. Okt. 05) und <http://www.irishexaminer.com/text/story.asp?j=427940975469&p=4z794x976x78&n=427940976133> (28. Nov. 05).
- Häder, D.-P. (2004):**
 Nastien, endogene Rhythmen und Photoperiodismus. *Photobiologie Vorlesung, 4. Kapitel*. Lehrstuhl für Ökophysiologie an der Universität Erlangen Nürnberg. http://www.biologie.uni-erlangen.de/botanik1/photobiologie/kapitel_4.htm (21. Okt. 05).
- Haffner, M., Stutz, H.-P. B. (1985 – 86):**
 Abundance of *Pipistrellus pipistrellus* and *Pipistrellus kuhlii* foraging at street-lamp. *Myotis* 32–24: 167–172.
- Haymes, G. T., Patrick, P. H. et al. (1984):**
 Attraction of fish to mercury vapor light and its application in a generating station forebay. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie* 69(6): 867–876.
- Heiling, A. M. (1999):**
 Why do nocturnal orb-web spiders (Araneidae) search for light? *Behavioral Ecology and Sociobiology* 46(1): 43–49.
- IDA International Dark-Sky Association (2003):**
 Zum Einfluss künstlicher Beleuchtung auf Tiere. Information Sheet 178 (Deutsch). <http://www.astro.univie.ac.at/~agb/TP/IDA187.html> (21. Okt. 05).
- IRD Institut de recherche pour le développement (1999):**
 La lumière artificielle a-t-elle le même effet que la lumière naturelle sur l'horloge biologique ? Une étude chez des rongeurs sahéliens. *Fiche scientifiques* 88. <http://www.ird.fr/fr/actualites/fiches/1999/fiche88.htm> (21. Okt. 05).
- Jaeger, R. G., Hailman, J. P. (1973):**
 Effects of intensity on the phototactic responses of adult anuran amphibians: a comparative survey. *Z. Tierpsychol.* 33: 352–407.
- Jones, J. (2000):**
 Impact of lighting on bats. *Guidelines*. <http://www.lbp.org.uk/07library/LIGHTING%20AND%20BATS.pdf> (21. Okt. 05).
- Klaus, G. (2005):**
 Empfehlung zur Vermeidung von Lichtemissionen. Ausmass, Ursachen und Auswirkungen auf die Umwelt. *Vollzug Umwelt*. Hrsg. vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.
- Kobler, R. L. (2003):**
 Die Lichtverschmutzung in der Schweiz. Mögliche Auswirkungen und praktische Lösungsansätze. *Diplomarbeit*. FHBB, Fachhochschule beider Basel, 43 S.

- Kolligs, D. (2000):**
Ecological effects of artificial light sources on nocturnally active insects, in particular on butterflies (Lepidoptera). *Faunistisch-Oekologische Mitteilungen Supplement* 28: 1 – 136.
- Kotler B. P. (1984):**
Risk of predation and the structure of desert rodent communities. *Ecology* 65: 689 – 701.
- Kousky, C. (2004):**
A building less bright. Chicago Skycrapers go dark for migratory birds. *Terrain.org*:15.
<http://www.terrain.org/articles/15/kousky.htm> (21. Okt. 05).
- Krättli, H., SSF (2005):**
Fassaden-Beleuchtungen: eine Bedrohung für Fledermäuse? *Fledermaus-Anzeiger FMAZ* 80: 10 – 11.
- Larcher, W. (1984):**
Ökologie der Pflanzen auf physiologischer Grundlage. 4., überarb. Aufl. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Lariner, M., Boyer-Bernard, S. (1991):**
Smolts downstream migration at Poutes Dam on the Allier River: Use of mercury lights to increase the efficiency of a fish bypass structure. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 323: 129 – 148.
- Larkin, R. P., Frase, B. A. (1988):**
Circular paths of birds flying near a broadcasting tower in cloud. *Journal of Comparative Psychology* 102: 90 – 93.
- Le Corre, M., Ollivier, A. et al. (2002):**
Light-induced mortality of petrels: A 4-year study from Reunion Island (Indian Ocean). *Biological Conservation* 105(1): 93 – 102.
- Lima, S. L. (1998):**
Stress and decision-making under the risk of predation: recent developments from behavioral, reproductive, and ecological perspectives. *Adv Stud Behav* 27: 215 – 90.
- Lloyd, J. E. (2002):**
Stray light, fireflies, and fireflyers (abstract). The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference).
<http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).
- Lloyd, J. E. (1994):**
Where are the lightningbugs? *Fireflyer Companion* 1: S. 1, 2, 5, 10.
<http://firefly.ifas.ufl.edu/ffcomp1-1.pdf> (21. Okt. 05).
- Löfken, J. O. (2005):**
Leuchtdioden erobern die Strasse. [wissenschaft.de](http://www.wissenschaft.de), Konradin Relations GmbH.
- Longcore, T., Rich, C. (2001):**
A review of the ecological effects of road reconfiguration and expansion on coastal wetland ecosystem. The Urban Wildlands Group, Los Angeles.
<http://www.urbanwildlands.org/Resources/lightnoiseroads.pdf> (3. Nov. 06).
- Longcore, T., Rich, C. (2004):**
Ecological light pollution. *Front Ecol Environ* 2(4): 191 – 198.
- Maise, G., Breton, B. (1996):**
Contrôle photopériodique de la saison de reproduction chez les salmonidés. *INRA Production Animales* 9(1): 71 – 77.
- Manville, A. M., II. (2000):**
The ABCs of avoiding bird collisions at communication towers: the next step. Proceedings of the Avian Interactions Workshop, December 2, 1999, Charleston, SC. Electric Power Research Institute.
- Moore, M. V., Kohler, S. J. (2002):**
Measuring light pollution in urban lakes and its effects on lake invertebrates (abstract). The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference).
<http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).

- Moore, M. V., Pierce, S. M., Walsh, H. M., Kvalvik, S. K., Lim, J. D. (2000):**
Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* Stuttgart, 27: 1 – 4.
- Munday, P. L., Jones, G. P. et al. (1998):**
Enhancement of recruitment to coral reefs using light-attractor. *Bulletin of Marine Science* 63(3): 581 – 588.
- Nakamura, T., Yamashita, S. (1997):**
Phototactic behaviour of nocturnal and diurnal spiders: negative and positive phototaxis. *Zool. Sci.* 14: 199 – 203.
- Nemeth, R. S., Anderson, J. J. (1992):**
Response of juvenile coho and chinook salmon to strobe and mercury vapor light. *North American Journal of Fisheries Management* 12(4): 684 – 692.
- New York City Audubon (2006):**
Lights Out NY. <http://www.nycaudubon.org> (23. Nov. 06).
- Nightingale, B., Simenstad, C. (2002):**
Artificial night-lighting effects on salmon and other fishes in the Northwest (abstract).
The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference).
<http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).
- Ogden, L. J. E. (1996):**
Collision Course: The hazards of lighted structures and windows to migrating birds. A special report for World Wildlife Fund Canada and the Fatal Light Awareness Program.
- Pauley, S. M. (2004):**
Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses* 63: 588 – 596.
- Perry, G., Buden, D. W. (1999):**
Ecology behavior and color variation of the green tree skink, *Lamprolepis smaragdina* (Lacertilla: Scincidae), in Micronesia. *Micronesia* 31(2): 263 – 273.
- Piller, S. (2004):**
EnLight. EU-Projekt. Zwischenbericht. 48 S.
- Podolsky, R. (2002):**
Artificial lighting and the decline of seabirds (abstract). The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference).
<http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).
- Rand, A. S., Bridarolli, M. E., Dries, L., Ryan, M. J. (1997):**
Light levels influence female choice in Túngara frogs: predation risk assessment? *Copeia* 1997: 447 – 50.
- Reed, J. R., Sincock, J. L. et al. (1985):**
Light attraction in endangered procellariiform birds: Reduction by shielding upward radiation. *Auk* 102(2): 377 – 383.
- Rich, C., Longcore, T. (2006):**
Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. Island Press, Washington. 329 S.
- Rich, C., Longcore, T. (2002):**
The Urban Wildlands Group Ecological Consequences of Artificial Night lighting. (conference).
<http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).
- Rydell, J., Baagøe, H. J. (1996):**
Bats & streetlamp. *Bats* 14(4):10 – 13.
- Salmon, M., Tolbert, M. G. et al. (1995):**
Behavior of loggerhead sea turtles on an urban beach. II. Hatchling orientation. *Journal of Herpetology* 29(4): 568 – 576.
- Salmon, M., Tolbert, M. G., Painter, D.P. et al. (1995):**
Behavior of loggerhead sea turtles on an urban beach. II. Hatchling orientation. *J. Herpetol.* 29: 568 – 76.

- Salmon, M., Witherington, B. E. (1995):**
Artificial lighting and seafinding by loggerhead hatchlings: Evidence for lunar modulation. *Copeia* 1995(4): 931 – 938.
- Sauveur, B. (1996):**
Photopériodisme et reproduction des oiseaux domestiques femelleS. *INRA Production Animales* 9(1): 25 – 34.
- Schanowski, A. (2000?):**
Aktiv für umweltgerechte Beleuchtung. Institut für Landschaftsökologie in Bühl.
<http://www.nabu.de/downloads/nachbar-natur/umweltgerechte-beleuchtung.doc> (21. Okt. 05).
- Scheibe, M. A. (2003):**
Über den Einfluss von Strassenbeleuchtung auf aquatische Insekten: Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Diptera: Simuliidae, Chironomidae, Empididae. *Natur und Landschaft: Zeitschrift für Naturschutz und Landschaftspflege* 78(6): 264 – 267.
- Scheibe, A. M. (2000):**
Quantitative Aspekte der Anziehungskraft von Strassenbeleuchtungen auf die Emergenz aus nahegelegenen Gewässern (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Diptera: Simuliidae, Chironomidae, Empididae) unter Berücksichtigung der spektralen Emission verschiedener Lichtquellen. Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz. 156 S. und Anhang.
- Scheibe, M. A. (1999):**
Über die Attraktivität von Strassenbeleuchtungen auf Insekten aus nahe gelegenen Gewässern unter Berücksichtigung unterschiedlicher UV-Emission der Lampen. *Natur und Landschaft: Zeitschrift für Naturschutz und Landschaftspflege* 74(4): 144 – 146.
- Schmidt, R. F., Hrsg. (1980):**
Grundriss der Sinnesphysiologie. Mit Beitr. von H. Altner et al., 4. korr. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Schwalb, H. H. (1961):**
Beiträge zur Biologie der einheimischen Lampyriden *Lampyrus noctiluca* Geoffr. und *Phausis splendidula* Lec. und experimentelle Analyse ihres Beutefang- und SexualverhaltenS. *Zool. Jb. Syst.* 88: 399 – 550.
- Schweizerische Vogelwarte Sempach (?):**
Störung nächtlich ziehender Vögel durch künstliche Lichtquellen (Behördebrief).
- Schweizerische Vogelwarte Sempach (2004):**
Medienmitteilung vom 15. Oktober 2004: Hochnebel als Gefahr für die Zugvögel.
- Science A Go Go (1999):**
Bird Problems? http://www.scienceagogo.com/news/19990828062707data_trunc_sys.shtml (21. Okt. 05).
- Scottish Anglers National Association (1998):**
Light Nuisance – Stonehaven Case.
<http://www.sana.org.uk/Light%20Nuisance.htm> (21. Okt. 05).
- Shire, G. G., Brown, K., Winegrad, G. (2000):**
Communication towers: a deadly hazard to birdS. Report documentS.
A report compiled by American Bird Conservancy. Killing of 230 bird species.
- Strassmann, B. (2002):**
Mörderischer Mond. *Die Zeit* 52/2002.
http://www.zeit.de/2002/52/Dark_Sky (21. Okt. 05).
- Summers, C. G. (1997):**
Phototactic behavior of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) crawlerS. *Annals of the Entomological Society of America* 90(3): 372 – 379.
- Svensson, A. M., Rydell, J. (1998):**
Mercury vapour lamps interfere with the bat defence of tympanate moths (Operophtera spp.; Geometridae). *Animal Behaviour* 55(1): 223 – 226.

Tages-Anzeiger Online (2005):

Vermischtes vom 24.09.2005: New York verdunkelt für Zugvögel.
<http://www.tages-anzeiger.ch/dyn/news/vermishtes/543313.html> (21. Okt. 05).

The Field Museum (2002):

Turning off building lights reduces bird window-kill by 83%. Science Blog, May 2002.
<http://www.scienceblog.com/community/older/2002/F/20022503.html> (21. Okt. 05).

The Port of Los Angeles:

Vincent Thomas Bridge Lighting Statistics.
http://www.portoflosangeles.org/community_VTB.htm (21. Okt. 05).

The Urban Wildlands Group (2002):

Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. Bibliography.
<http://www.urbanwildlands.org/nightlightbiblio.html> (22. Okt. 05).

The Urban Wildlands Group (2000):

Re: Vincent Thomas Bridge Lighting, Application No. 5-00-384 (Oppose).
<http://www.urbanwildlands.org/CCC20001115.pdf> (21. Okt. 05).

Theiler, A. (2004):

Unterschiedliche Ausflugszeiten bei der Kleinen Hufeisennase – Landschaftsstrukturen beeinflussen den Aufbruch zur Jagd. FMAZ 79: 4

Trapp, J. L. (1998):

Bird kills at towers and other man-made structures: an annotated partial bibliography (1960–1998). U.S. Fish and Wildlife Service Office of Migratory Bird Management.

Wiese, F. K., Montevecchi, W. A. et al. (2001):

Seabirds at risk around offshore oil platforms in the North-west Atlantic.
Marine Pollution Bulletin 42(12): 1285–1290.

Wikipedia: Die freie Enzyklopädie.

<http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite> (17. Nov. 05).

Wise, S., Buchanan, B. W. (2002):

The influence of artificial illumination on the nocturnal behavior and ecology of salamanders (abstract).
The Urban Wildlands Group and Ecological consequences of artificial night lighting (conference).
<http://www.urbanwildlands.org/abstracts.html> (21. Okt. 05).

Wüthrich, F. (2001):

Stress für Mensch und Tier. Macht das Licht aus! natur&kosmos, 2001(2). http://www.home.datacomm.ch/fritz.wuethrich/schildkroeten/meeresschildkroeten/presse_licht.html (21. Okt. 05).

Yurk, H., Trites, A. W. (2000):

Experimental attempts to reduce predation by harbor seals on out-migrating juvenile salmonids.
Trans. Am. Fish. Soc. 129: 1360-66.

Zumthor, P., Beer, I., Mathieu, J., Marcacci, M., Hungerbühler,

R., Morici, L., Wunderle, S., Maus, K. (2006):
Wieviel Licht braucht der Mensch, um leben zu können, und wieviel Dunkelheit?
vdf, Hochsch.-Verlag an der ETH. 222 S.

8 GLOSSAR

Beleuchtungsstärke

Einheit: Lux (lx), $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$

Umgangssprachlich ist die Beleuchtungsstärke ein Mass für die Helligkeit, mit der z. B. eine Arbeitsfläche ausgeleuchtet wird. Die Beleuchtungsstärke wird mit dem Luxmeter gemessen (vgl. Tab. 1).

Biolumineszenz

Organismen senden Licht aus, das durch eine chemische Reaktion (Oxidation bestimmter Leuchtstoffe unter katalytischer Wirkung des Enzyms Luciferase) in den Zellen entsteht.

Candela

Candela gibt die Lichtstärke an, die von einer Lichtquelle in eine bestimmte Richtung emittiert wird. Eine Kerze strahlt in alle Raumrichtungen insgesamt eine Lichtstärke von 1 Candela (cd) ab. > *Kelvin*.

Circadianer Rhythmus

(von lat. circa, ungefähr, und dies, Tag) Tagesperiodizität, biologische Abläufe im 24-Stunden-Rhythmus bei Bakterien, Einzellern, Pflanzen und Tieren (z.B. Blattbewegungen bei Pflanzen, Aktivität bei Tieren, Schlaf-Wach-Zyklus beim Menschen). Der circadiane Rhythmus steht mit Licht im Zusammenhang (vgl. Innere Uhr).

Diurnal

Nur bei Tag auftretend (diurnale Rhythmik: Rhythmik bei Tageslicht, diurnale Tierart: tagesaktive Tierart).

Endogen

Im Körper selbst entstanden, von innen kommend, innerlich, nicht von aussen zugeführt.

Fluoreszenz

Fluoreszenz ist der Übergang eines elektronisch angeregten Systems in einen Zustand niedrigerer Energie durch spontane Aussendung von Licht. Der Name «Fluoreszenz» ist von dem fluoreszierenden Mineral Fluorit (Flussspat, Calciumfluorid, CaF_2) abgeleitet. Anwendungsgebiete: z. B. Leuchtstoffröhren, Leuchtdioden. Werden Leuchtstoffe mit bestimmten chemischen Elementen aktiviert, lassen sich verschiedene Farben erzeugen.

Frühling > Jahreszeiten

Herbst > Jahreszeiten

Hochdrucklampe

Auch Hochdruck-Entladungslampen. Hochdrucklampen sind entweder Quecksilberdampf-Hochdrucklampen (Quecksilberdampflampen), Halogen-Metaldampflampen (Metall-Halogenlampen) oder Natriumdampf-Hochdrucklampen (Natrium-Hochdrucklampen). Sie arbeiten mit hohem Druck.

Hypothalamus

Teil des Zwischenhirns, Sitz von Nervenzentren für die wichtigsten Regulationsvorgänge des Organismus, Bildungsort verschiedener Hormone.

Innere Uhr

Auch physiologische oder biologische Uhr. Physiologische Zeitmessung der Tiere und Pflanzen. Da sehr viele Rhythmen mit Licht in Zusammenhang stehen, muss die innere Uhr in Verbindung mit Lichtrezeptoren stehen. Die innere Uhr läuft weitgehend unabhängig von der Temperatur. Der Sitz der inneren Uhr liegt beim Menschen im > *Hypothalamus*.

Jahreszeiten

Grundsätzlich sind die beschriebenen Jahreszeiten folgendermassen zusammengesetzt: Frühling (März bis Mai), Sommer (Juni bis August), Herbst (September bis November) und Winter (Dezember bis Februar). Allerdings sind artspezifisch manchmal leicht andere Grenzen gültig, weshalb bei schutzwürdigen Arten die Zeitperioden für Massnahmen von Fachleuten fallweise festgelegt werden sollten.

Kelvin

Temperatureinheit gemäss aktuellem SI Standard, die auch für die Farbtemperatur verwendet wird. Mittleres Sonnenlicht beträgt 5.500 Kelvin. Siehe auch > *Candela*

Kurztag/Langtag

Bestimmt durch die saisonal wechselnde Tageslänge. Unterschied kann artspezifisch variabel sein, z. B. Kurztag < 12 Stunden Tageslicht, Langtag ≥ 12 Stunden Tageslicht.

Leuchtdioden

In weissen Leuchtdioden (LED) wandelt ein Fluoreszenzfarbstoff das blaue Licht, das ein Halbleiterkristall erzeugt, in weisses Licht um.

Leuchte

Vorrichtung zur Aufnahme von künstlichen Lichtquellen (z. B. Lampen) und zur besseren Verteilung des von der Lichtquelle abgestrahlten Lichtes.

Leuchtstoffe, Leuchtmittel

Durch geeignete Mischung der Leuchtstoffe lässt sich ein grosses Spektrum an nutzbaren Lichtwellenlängen und Farbtemperaturen realisieren, wodurch das Leuchtmittel auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden kann. In Leuchtstoffröhren wird z. B. das Spektrum des Sonnenlichts (kaltweiss) oder das einer Glühlampe (warmweiss) nachgebildet. Es werden auch monochromatische Farben (rot, grün, blau, ...) und Mischfarben (violett, pink, ...) realisiert.

Leuchtstoffröhren

In Leuchtstoffröhren wird ultraviolettes Licht, das durch Gasentladung in der mit Quecksilberdampf gefüllten Röhre erzeugt wird, in sichtbares Licht umgewandelt.

Licht

Sichtbares Licht ist elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 380–780 nm. Elektromagnetische Strahlung mit einer niedrigeren Wellenlänge als violett wird bis zu einer bestimmten Frequenz als Ultraviolett-Strahlung UV bezeichnet; solche mit höherer Wellenlänge als rot bis zu einer bestimmten Wellenlänge als Infrarotstrahlung IR (vgl. Tab. 2).

Lichtemission

Ausgesendetes Licht von einer bestimmten Lichtquelle (vgl. auch > *Lichtimmission*).

Lichtglocke, Lichtdom

Zur Lichtglockenbildung über Agglomerationen kommt es durch Strahlungsnebel, der vor allem im Herbst und im Winter bei windschwachen Wetterlagen entstehen kann. In klaren Nächten können sich die bodennahen Luftschichten infolge der Ausstrahlung stark abkühlen. Dadurch kondensiert der Wasserdampf in der Luft, und es bildet sich Nebel. Im Herbst und im Winter ist die Einstrahlung der Sonne bisweilen nicht stark genug, die Luft zu erwärmen und den Nebel aufzulösen, sodass das neblig-trübe Wetter in den Niederungen oft tagelang erhalten bleibt.

Lichtimmission

Meist als «Lichtverschmutzung» bezeichnet, aus der wörtlichen Übersetzung des englischen «Light pollution». Im Übermass verbrauchtes Licht, im Allgemeinen bei künstlicher Aussenbeleuchtung, das als Störgrösse in der Umwelt und im Naturhaushalt wirksam wird. Im vorliegenden Bericht wird der Begriff «Lichtimmission» verwendet.

Lichtintensität

Mass für die Anzahl der Lichtquanten, die pro Fläche und Zeiteinheit auftreten.

Lichtspektrum

Verteilung der unterschiedlichen Wellenlängen, in die das Licht zerlegt werden kann: kurzwelliges ultraviolettes Licht, sichtbares Licht (blau, grün, gelb, rot) und langwelliges Infrarot (vgl. Tab. 2, 3).

Lichtverschmutzung

> Lichtimmission

Melatonin

Hormon, das in der > *Zirbeldrüse* im > *Hypothalamus* des Zwischenhirns in Abhängigkeit vom Hell-Dunkel-Rhythmus abgesondert wird. Über das Melatonin werden der Schlaf-Wach-Rhythmus und andere zeitabhängige Rhythmen des Körpers gesteuert. Es ist zudem wichtig in der Immunabwehr.

Monochromatisches Licht

Licht einer einzigen Wellenlänge.

Photoperiodismus

Einfluss der Tageslänge (Photoperiode) auf die Entwicklung von Pflanzen und Tieren.

Photorezeptoren

Pigmentmoleküle, die Licht bzw. Strahlung im weiteren Sinne absorbieren und dadurch Stoffwechselfvorgänge in Gang setzen oder chemische Umsetzungen verursachen.

Retinale Ganglionzellen RGC

Nervenzellen in der menschlichen Netzhaut («Retinale Ganglionzellen» = RGC), die am empfindlichsten auf Licht blauer Wellenlänge reagieren.

Sommer > Jahreszeiten

Winter > Jahreszeiten

Zirbeldrüse

Epiphyse, Corpus pineale, Glandula pinealis. An der Gehirnbasis im Zwischenhirn gelegenes kleines Organ. Bildungsort von > *Melatonin*. Bei Fischen, Amphibien, Reptilien und vielen Vögeln ist die Zirbeldrüse noch selbst lichtempfindlich, bei Säugetieren gelangen Lichtreize indirekt über Netzhaut, Sehnerv, > *Hypothalamus* zur Epiphyse.

Gesetzliche Grundlagen in der Schweiz

Bundesgesetz über den Umweltschutz (vom 7.10.83, Stand Juli 96)

Art. 1 Zweck

- 1 Dieses Gesetz soll Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen *schädliche oder lästige Einwirkungen* schützen ...
- 2 Im Sinne der Vorsorge sind Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, *frühzeitig zu begrenzen*.

Art. 6 Information und Beratung

Die Umweltschutzfachstellen ... empfehlen Massnahmen zur Verminderung der Umweltbelastung.

Art. 11 Grundsatz

- 1 Luftverunreinigung, Lärm, Erschütterungen und *Strahlen* werden durch Massnahmen bei der Quelle begrenzt (Emissionsbegrenzung).
- 2 Unabhängig von der bestehenden *Umweltbelastung sind Emissionen im Rahmen* der Vorsorge so weit zu *begrenzen*, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist.

Bundesgesetz über die Jagd und den Schutz wildlebender Säugetiere und Vögel
(vom 20.6.86)

Art. 2

- 4 Die Kantone sorgen für einen ausreichenden Schutz der wildlebenden Säugetiere und Vögel vor Störungen.

Lichtimmissionen können auch in den kommunalen Bau- oder Polizeiverordnungen begrenzt werden, hier ein Beispiel aus der Stadt Zürich:

Allgemeine Polizeiverordnung der Stadt Zürich

Art. 9 Immissionen

Vermeidbare, gesundheitsschädigende oder belästigende Einwirkungen namentlich durch Erschütterungen, Staub, Russ, Rauch, Geruch, Abgase oder Lichtquellen sind verboten.

9 ANHANG

Eingesetzte Lampen am Beispiel der Stadt Zürich

Die Abteilung Beleuchtung bei ewz stützt sich auf die Leitsätze und Normen der Schweizer Licht Gesellschaft (SLG), in denen Beleuchtungswerte sowie Form und Höhe der Kandelaber festgelegt werden.

Die Lampentypen, die in Zürich eingesetzt werden, sind in derselben Reihenfolge wie im Kapitel *Umweltverträglichkeit verschiedener Lampentypen*, S. 57 aufgeführt.

Tab. 5: Eingesetzte Lampen in Zürich. Die Zahlen beziehen sich auf den 1.10.2005 (ewz).

	Lampentyp	Stück	Bemerkung
1.	Natriumdampf-Niederdrucklampe	3237	Heute ausschliesslich in Inselfschutzpfosten eingesetzt.
2.	Natriumdampf-Hochdrucklampe	29 484	Strassenbeleuchtung (Standardleuchtmittel)
3.	Leuchtstofflampe (T-Lampe)	10 139	Tunnels, Unter- und Überführungen, Passagen, VBZ-Haltestellen
4.	Kompakt-Leuchtstofflampe (TC-Lampe)	7 531	Shop Ville, Fussgängerzonen, Dekorationen etc.
5.	Quecksilberdampf-Hochdrucklampe	3 044	Werden bei Neuanlagen kaum mehr verwendet; alte Anlagen werden durch andere Beleuchtungsanlagen ersetzt.
	Glühlampe	128	Laternen in der Altstadt (Fussgängerzone)
	Halogen-Metaldampf Lampe	950	Ausgewählte Plätze, Strassen (Ergänzung zu Natrium-Hochdrucklampen; helle Wirkung)
	Induktionslampe (QL)	54	Schwer zugängliche Kandelaber (Lebensdauer)
	Mischlicht und andere (v. a. LEDs)	425	LEDs: Anstrahlen und «Bestreichen» mit Licht, z. B. Viadukt, Brunnen, Wegweiser
	Total	54 992	

Impressum

Konzept und Text:

Therese Hotz und Fabio Bontadina, SWILD Zürich

fabio.bontadina@swild.ch

www.swild.ch

Telefon 044 450 68 05

Lektorat:

Kathi Märki, SWILD Zürich

Begleitgruppe:

Stefan Hose, Grün Stadt Zürich,

Alessandra Wüst und

Maria Aström, Amt für Städtebau Zürich

Wir danken den folgenden Personen herzlich für kritische Rückmeldungen und wertvolle Kommentare:

Stephan Bleuel, Amt für Städtebau Zürich

Sandra Gloor und Daniel Hegglin, SWILD Zürich

Christian Scherrer, TED

Karl Tschanz, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich

Antonio Righetti, BAFU

Team Plan Lumière Stadt Zürich

Steuerungsgruppe Plan Lumière Stadt Zürich

Gestaltung:

Juliet Haller und

Karin Weisener, Amt für Städtebau Zürich

Grundlage für Grün Stadt Zürich

und Amt für Städtebau Zürich

Zitativorschlag:

Hotz, T. & Bontadina, F. 2007. ~~Allgemeine~~ ökologische Auswirkungen künstlicher Beleuchtung. Unpublizierter Bericht von SWILD als Grundlage für Grün Stadt Zürich und Amt für Städtebau Zürich. 78 Seiten.