Lärmprobleme an Eisenbahnlinien

Autor(en): **Scherrer, H.U.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **96 (1978)**

Heft 26: **SIA-Heft, 3/1978: Dimensionierungsprobleme bei Heizungsanlagen**

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-73713

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Mindestmass, was man an Wärmedämmvorschriften *verlangen muss*.

- Im Hinblick auf die kommenden Energieprobleme und unter Berücksichtigung, dass für Heizzwecke rund 50% des Gesamtenergiebedarfes verbraucht werden, kann man den Wärmeschutz kaum übertreiben.

Die *nachträgliche Wärmedämmung* dagegen ist – wenn überhaupt möglich – nur mit grossem technischem und wirtschaftlichem Aufwand zu bewerkstelligen.

Adresse des Verfassers: *F. Venosta*, Architekt, Olgastrasse 10, 8001 Zürich.

Lärmprobleme an Eisenbahnlinien

Von **H. U. Scherrer**, Zürich

Problemstellung

Die mit dem Ansteigen des allgemeinen Lärmpegels verbundene Sensibilisierung der Bevölkerung führt zu immer häufiger werdenden Klagen über Lärmbelästigungen. Die Toleranz gegenüber zusätzlichem Lärm nimmt mit den zunehmenden allgemeinen Geräuschbelästigungen stetig ab, d.h. die Empfindlichkeit der Bevölkerung gegenüber Veränderungen des Lärmmasses wächst.

Bestehenden Lärmimmissionen kann, natürlich bis zu einem gewissen Grad abhängig vom sozialen Status des Betroffenen, ausgewichen werden. Wo aber durch Infrastrukturvorhaben starke Änderungen der Belärmung zu erwarten sind, entstehen sofort neue Konflikte mit den Lärmbetroffenen. Dieser Tatsache trägt im übrigen auch das Bundesgericht in seinen Entscheiden über Entschädigungsforderungen für Immissionen von Autobahnen Rechnung (z.B. BGE 94 I 286 ff., BGE 95 I 490 ff.).

Derartige Lärmprobleme sind bisher vor allem entlang der Autobahnen offenkundig geworden und in dem Mass sind weitgehend auch die erforderlichen Grundlagen zur Analyse des Strassenlärms bereitgestellt worden [5]. Auch an neuerbauten Eisenbahnlinien ist mit Immissionen zu rechnen, die die Lärmverhältnisse stark ändern und die vorteilhaft bereits im Projektierungsstadium mitberücksichtigt werden.

Diese Erfordernisse wurden bei der im Zuge des Ausbaus der Flughafenlinie Kloten neu projektierten Linienverlegung bei Bassersdorf – auch als Auflage des eisenbahnrechtlichen Plangenehmigungsverfahren – von den SBB, namentlich Baukreis III, in vorbildlicher Weise wahrgenommen (vgl. Bild 1). Entlang dieser Linie werden neben den üblichen Projektierungsarbeiten auch die zu erwartenden Lärmprobleme untersucht und mit der bereits heute bestehenden Lärmsituation verglichen. Inhaltlich besteht diese Lärmuntersuchung aus:

- der Analyse des Ist-Zustandes
- der Analyse des zukünftigen Zustandes
- einer Analyse der zu erwartenden Konflikte zwischen Siedlung und Schienenlärm

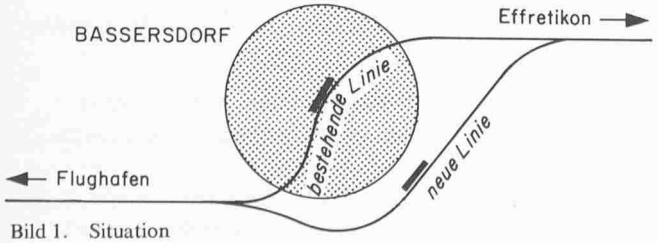


Bild 1. Situation

- dem Vorschlag möglicher Lärmschutzmassnahmen sowie
- einer abschliessenden Bilanzierung der verschiedenen untersuchten Belärmungszustände.

Besondere Probleme des Bahnlärms

Im Gegensatz zum Strassenlärm, wo auf eine umfangreiche, auch schweizerische Literatur zurückgegriffen werden kann, und wo z.B. im Schlussbericht [1] der vom ASF eingesetzten Expertenkommission sowohl Immissionsgrenzwerte als auch ein Emissions- und Ausbreitungsmodell präsentiert werden, sind Grundlagen des Bahnlärms eher spärlich zu finden und können nicht unbesehen für die anzustellenden Untersuchungen angewandt werden.

Mit dem Zweck, die Grundlagen auch von wissenschaftlicher Seite her so weit als möglich abzustützen, wurde zur fachlichen Begleitung das sogenannte Beraterteam einberufen. Berater für physikalisch-akustische Probleme (Emissionen) waren Herr Prof. A. Lauber und Dr. R. Hofmann von der EMPA Dübendorf, im Bereich der sozial-medizinischen Probleme (Immissionen), Prof. E. Grandjean vom Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie der ETH Zürich und für Verhaltensprobleme (Befragung) Dr. H. Weiss von der IMR AG, Institut für Marktforschung.

Bevor die eigentliche Analyse der Situation in Bassersdorf aufgenommen werden konnte, waren insbesondere die folgenden Fragen abzuklären und zu lösen:

- Welches Lärmmass ist für den Bahnlärm am besten geeignet? Vom Strassenlärm her kennt man in der Schweiz z.B. den statistischen Pegel L_{50}. Die besondere Art des intermittierenden Charakters des Bahnlärms macht dieses Mass hierfür jedoch ungeeignet. Aus verschiedenen Überlegungen wurde schliesslich der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{eq} gewählt (Bild 2).
- Wie soll ein Emissions- und Ausbreitungsmodell gestaltet sein, damit es erlaubt, Lärmprognosen anzustellen? Der grundsätzliche Aufbau des verwendeten Modells wird im folgenden Kapitel dargestellt.
- Welche Immissionsgrenzwerte sollen für den Schutz der Siedlung vor Bahnlärm gelten? Diese Fragestellung wäre an sich nur durch umfangreiche soziopsychologische Untersuchungen verbindlich zu beantworten. In einem nachfolgenden Kapitel werden dazu einige Gedanken geäussert.

Lärmmodell

Das verwendete Lärmmass, der energieäquivalente Dauerschallpegel, lässt sich aus dem Mittelwert der in einer Zeiteinheit (z.B. einer Stunde) emittierten Schallenergie berechnen,

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T P(t)\, dt \right]$$

wobei die Schallenergie $P(t)$ aus dem zeitlich schwankenden Lärmpegel $L(t)$ berechnet wird:

$$P(t) = 10^{\frac{L(t)}{10}}$$

Die zeitlichen Schwankungen des Bahnlärms, bzw. der emittierten Schallenergie können nun durch rechteckige Kurven näherungsweise dargestellt werden (laute Zugsdurchfahrten wechseln mit absoluter Ruhe). Damit lässt sich die Integration in eine Summation umwandeln:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_i \left(10^{\frac{Li}{10}} \cdot N_i \cdot \frac{l_i}{v_i} \right) \right]$$

L_i = Lärmpegel des Zugstyps i
N_i = Anzahl der Züge; pro Zeiteinheit T
l_i/v_i = Länge/Geschwindigkeit = Dauer der Lärmeinwirkung des Zuges i

Durch Messungen [3] konnte nun festgestellt werden, dass der Lärmpegel der einzelnen Züge in erster Näherung hauptsächlich durch deren Geschwindigkeit beeinflusst wird. Andere Einflüsse wie Zugstyp, Schienenoberbau usw. wurden bei den Messungen berücksichtigt, erwiesen sich jedoch bei heute gültigem Spektrum der Variation dieser Parameter als untergeordnet. Weiter kann die Lärmdämpfung durch die geometrische Ausbreitung für den L_{eq} mit 3 db (A) pro Abstandsverdoppelung festgelegt werden. Damit erhält das Emissionsmodell die Form:

$$L_{eq} = c_1 + 10 \log \left(\sum_i \frac{N_i\, l_i\, v_i^{c_2}}{D} \right)$$

wobei D die Distanz des Beobachters von der Bahnlinie bedeutet.

Zu der geometrischen Lärmausbreitung kommen noch Dämpfungseinflüsse des Bodens, die direkt von der mittleren Höhe der Verbindung Lärmquelle–Beobachter (h_m) abhangen und in der Form:

$$\Delta \text{ db/100 m} = {}^{c_3} \cdot h_m{}^{c_4}$$

dargestellt werden können. Dabei bedeuten die Faktoren ^{c_1} bis ^{c_4} Konstanten, welche anhand von Messresultaten kalibriert wurden.

Einfluss des Fahrplans

Der Aufbau des Lärmmodells zeigt deutlich, dass neben den topographischen Gegebenheiten entlang der Bahnlinie vor allem die betriebsabhängigen Einflussfaktoren, nämlich Anzahl der Züge pro Stunde, Zugslänge und Fahrgeschwindigkeit den Lärm beim Betroffenen beeinflussen. Um nun für zukünftige Betriebszustände gültige Lärmprognosen anstellen zu können, ist der Einfluss von Änderungen des Betriebes, vor allem des Fahrplans, genauer zu analysieren. Es wurden verschiedene zukünftig mögliche Betriebszustände untersucht, u. a. auch der Ersatz von Regionalzügen durch einen regelmässigen S-Bahn-Betrieb. Da der Lärmpegel L_{eq} im logarithmischen Massstab von der Anzahl Züge pro Stunde abhängt, ist jedoch bei genügender Anzahl (was in den massgebenden Stunden zutrifft) der Einfluss eines zusätzlichen Zuges gering. Er liegt je nach Zugstyp im Bereich von 0,5–1,2 db (A). Trotzdem wurde eine mögliche Verkehrszunahme in Zusammenarbeit mit der Betriebsabteilung der SBB-Kreisdirektion III bereits bei der Dimensionierung der zu treffenden Lärmschutzmassnahmen berücksichtigt. Dabei stellte sich heraus, dass die Unterschiede einzelner Lärmpegel im nicht wahrnehmbaren Bereich liegen. Die subjektive Beurteilung von Lärmunterschieden kann demgegenüber folgendermassen beschrieben werden [5]:

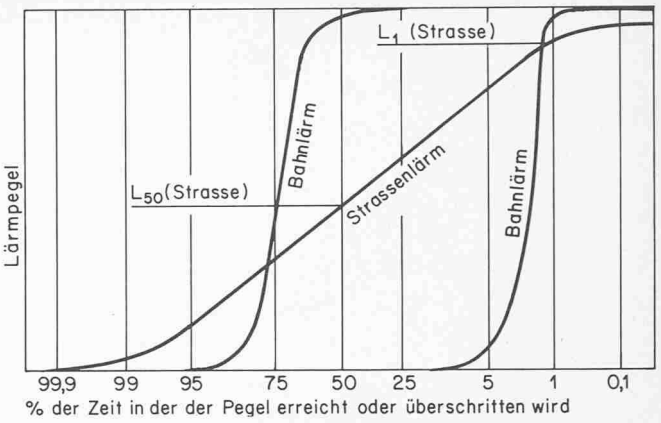


Bild 2. Vergleich von Strassen- und Schienenverkehrslärm anhand der Summenhäufigkeit

Veränderung	Empfinden
0– 2 db	nicht wahrnehmbar
2– 5 db	gerade wahrnehmbar, kleine Veränderung
5–10 db	deutlich wahrnehmbar
10 db	empfindungsmässige Verdoppelung
10–20 db	bedeutende und überragende Veränderung
20 db	überaus grosse Veränderung

Immissionsgrenzwerte

Wie erwähnt fehlen in der Schweiz vorläufig noch Untersuchungen, die es erlaubten, Immissionsgrenzwerte verbindlich festzulegen. Hierzu wird eine durch eine gezielte Umfrage empirisch zu erhebende, statistisch jedoch abgesicherte Korrelation zwischen dem akustischen Lärmmass und dem Störgrad unumgänglich, um jenen Schwellenwert zu ermitteln, bei dem die Störung infolge Lärm unzumutbar ansteigt. Arbeiten dieser Art sind zum Teil in der ausländischen Literatur zu finden [2, 6]. Obwohl diese Werte nicht unbesehen auf schweizerische Verhältnisse übertragen werden können, musste auf diese abgestützt werden. Ergänzt durch eigene Überlegungen sowie Erörterungen im Rahmen des Beraterteams konnten schliesslich Grenzwerte gefunden werden, die zur weitern Bearbeitung der Lärmprobleme in Bassersdorf Verwendung fanden. Dabei wurde auch dem Umstand Rechnung getragen, wonach Bahnlärm bei gleichem akustischen Pegel anerkannterweise weniger störend empfunden wird als Strassenverkehrslärm. Bestätigung fand diese Annahme schliesslich auch in den Ausführungen über Lärmprobleme an den Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahnen [4].

Die Grenzwerte erlauben sodann die Konflikte zwischen den prognostizierten Lärmpegeln und den Siedlungsgebieten aufzuzeigen und daraus auch die erforderlichen Schutzmassnahmen abzuleiten.

Schutzmassnahmen

Als Lärmschutzmassnahmen wurden vor allem bauliche Vorkehrungen entlang der Bahnlinie in Betracht gezogen. Andere Massnahmen, wie Schallschutzfenster, sind – obschon

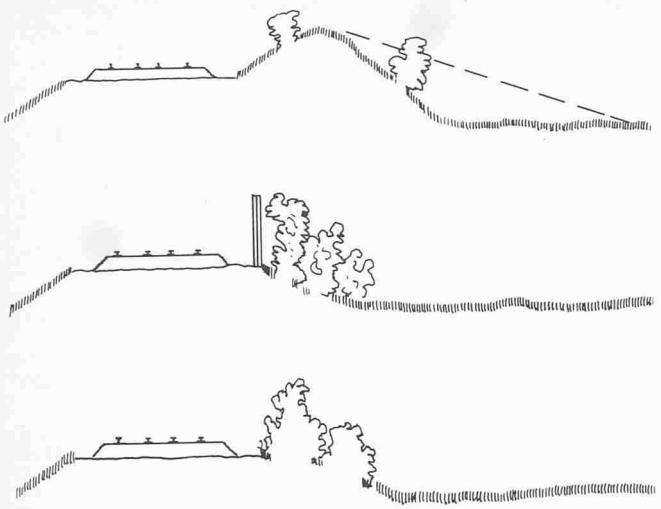


Bild 3. Massnahmentypen. Oben: Lärmschutzdamm, steil oder flach. Mitte: Lärmschutzwand. Unten: Kombination beider oder andere, vorwiegend gestalterische Möglichkeiten

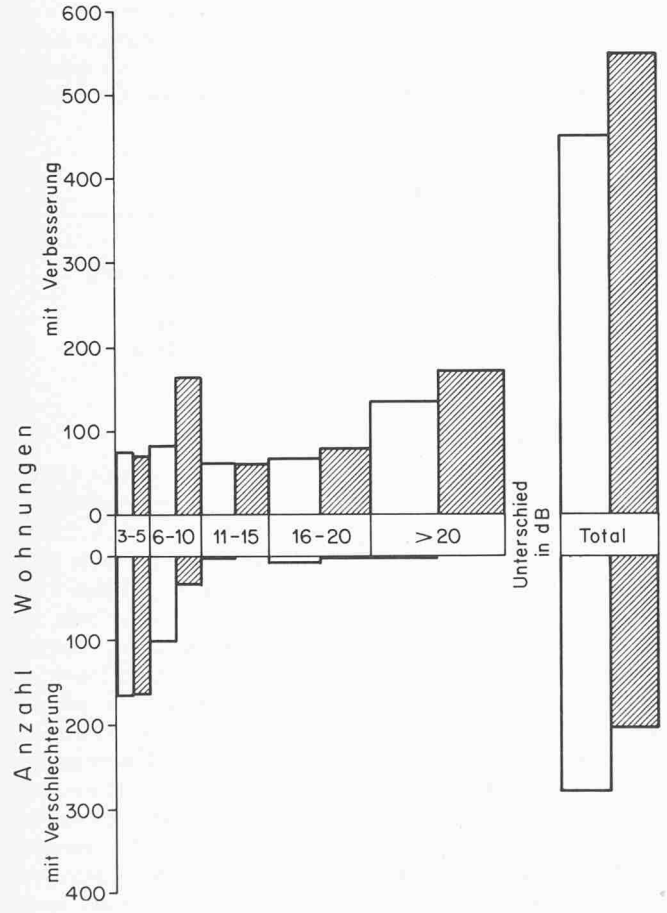


Bild 4. Vergleich der verschiedenen Lärmsituationen bei der Linienverlegung. Weisse Felder: ohne Lärmschutzmassnahmen. Schraffierte Felder: mit Lärmschutzmassnahmen

rationell, jedoch weil nur im Wohnungsinnern wirksam – nur dort einzusetzen, wo lediglich wenige Gebäude durch anderweitig sehr umfangreiche Massnahmen geschützt werden müssten oder aber die extremen Verhältnisse (z.B. an städtischen Expressstrassen) keine anderen Möglichkeiten mehr offenlassen.

Es sind mehrere Massnahmentypen denkbar, die sich zu einer Vielzahl von Massnahmen kombinieren lassen. Das Prinzip der Lärmschutzmassnahme im engeren Sinn (bauliche Massnahme, entlang des Verkehrsträgers) beruht darauf, dass der Lärmausbreitung ein Hindernis entgegengestellt wird. Je nach Lage des Beobachters und dem erwünschten Dämmwert der Massnahmen können nun die erforderlichen Abmessungen (Länge und Höhe) berechnet werden. Wenn diese Abmessungen erfüllt sind, ist es an sich für den Akustiker nebensächlich, womit sie erfüllt werden. Hier treten nun Kostenvergleiche und ästhetische Überlegungen in den Vordergrund. Je nach der Lage in der Landschaft, eventuellen Randbedingungen und den Kosten kann gewählt werden (vgl. Bild 3).

Neben der Kostenhöhe wird auch die Kostentragung zum bestimmenden Kriterium. Die SBB als Bauherrin kann nur dort für Lärmschutz einstehen, wo durch ihre Bauvorhaben eindeutig Verschlechterungen nachzuweisen sind. Um jedoch bei gleicher Gelegenheit mittels weitergehender Schutzmassnahmen zusätzliche, durchaus wünschbare qualitative Verbesserungen zu erzielen, müssen anderweitige Träger seitens der Nutzniesser gefunden werden.

Lärmbilanz

Zum Schluss der Lärmuntersuchung wurde die Wirkung des Bauvorhabens der SBB durch Vergleich der verschiedenen Lärmsituationen ermittelt:

- bestehende Linie, bisheriger alter Verkehr
- neue Linie ohne Schutzmassnahmen
- neue Linie mit Schutzmassnahmen.

Zu diesem Zweck wurde der Lärm in allen drei Situationen in den über 900 massgeblich betroffenen Wohnungen erhoben. Es zeigte sich erwartungsgemäss, dass die weitaus grösste Verbesserung der Lärmqualität bereits durch die Verlegung der Bahnlinie aus dem Dorfkern heraus erzielt wird (Bild 4). Der mittlere Lärmpegel je Wohnung verringert sich um 5 db. Diese Besserstellung wird nun durch die Lärmschutzmassnahmen um weitere 2 db verstärkt, wobei zu beachten ist, dass natürlich dabei vor allem stark betroffene Wohnungen um ein wesentliches mehr profitieren. Das heisst, dass die Lärmschutzmassnahmen diejenigen Wohnungen schützen, die durch die Linienverlegung an sich eine Verschlechterung erfahren hätten, so dass die Verminderung des mittleren Lärmpegels pro Wohnung allein keine vollumfängliche Aussage über die Verbesserung wiederzugeben vermag.

Schlussbemerkung

Nachdem es gelungen ist, für die praktische Anwendung am Fall der vorgesehenen Bahnlinienverlegung in Bassersdorf, ein sowohl emissions- als auch immissionsseitig taugliches und handliches Lärmmodell zu entwickeln, zeigte sich, dass durch wenige Lärmschutzmassnahmen eine deutliche qualitative Verbesserung erreicht werden kann. Die Aufwendungen für solche Massnahmen bewegen sich in einem durchaus angemessenen Rahmen. Selbstverständlich können die SBB nur in jenen Fällen für Lärmschutzmassnahmen aufkommen, wo Betroffene neu einem wesentlichen Schienenlärm ausgesetzt werden, und zwar innerhalb zumutbarer Grenzen. In der Regel ist gegebenenfalls ein an sich wünschbarer weiterreichender Lärmschutz angezeigt. Die entsprechenden Massnahmen könnten dann im Interesse einer höheren Umwelt- bzw. Wohnqualität zu Lasten der Nutzniesser erstellt werden.

Literaturverzeichnis

[1] *ASF. Immissionsschutz an Nationalstrassen.* Schlussbericht der vom Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau eingesetzten Expertenkommission. Bern, März 1974.

[2] *Aubrée D.:* «La géne due au bruit des trains.» Centre scientifique et technique du bâtiment, Nantes, Janvier 1975.

[3] *EMPA. Eisenbahnlärmmessungen in Eschlikon (TG), im Hinblick auf das von der Barbe AG ausgearbeitete Lärmmodell.* Untersuchungsbericht, Dübendorf, Juni 1977.

[4] *Klein N.:* «Lärmprobleme bei der Planung der Neubaustrecke Mannheim–Stuttgart.» «Die Bundesbahn», Heft 3, 1977.

[5] *Scherrer H.U.:* «Umweltplanung.» Vorlesungs-Skriptum. ETH Zürich, 1971/77.

[6] *Schultz T.J.:* «Development of an Acoustic Rating Scale for Assessing Annoyance caused by Wheel/Rail Noise in Urban Mass Transit.» Cambridge (Massachusetts), February 1974.

Adresse des Verfassers: *H.U. Scherrer,* dipl. Ing. ETH/SIA, Lehrbeauftragter für «Umweltplanung» an der ETHZ, c/o Barbe AG, Ingenieur- und Planungsbüro, Zollikerstrasse 128, 8008 Zürich.

Molekulare Prozesse der Muskelarbeit

Die Synchrotron-Strahlung, ursprünglich nur ein «Abfallprodukt der Hochenergie-Physik», verschafft erstmals Einblick in die letzten Ursachen der Muskeltätigkeit. Mit ihrer Hilfe verfolgen Wissenschaftler des *Max-Planck-Instituts für medizinische Forschung in Heidelberg* die molekularen Prozesse, die der Muskelarbeit zugrundeliegen: «Ruderbewegungen» von Molekülen, in deren Verlauf chemische Energie in mechanische Arbeitsleistung umgewandelt wird.

Als Strahlungsquelle dient den Biologen das *Deutsche Elektronen-Synchrotron* (DESY) in *Hamburg,* eines der grössten seiner Art. In ihm werden Elektronen längs einer kreisförmigen Bahn von hundert Metern Durchmesser auf Energien von mehr als sieben Milliarden Elektronenvolt beschleunigt. Sie erreichen dabei fast Lichtgeschwindigkeit und werden dann zur Erzeugung von Elementarteilchen auf Proben geschossen.

Die Synchrotron-Strahlung fällt bei solchen Versuchen als Nebenprodukt an, weil die Elektronen, während sie auf der Kreisbahn umlaufen, ständig Energie in Form elektromagnetischer Wellen abgeben. Die Intensität dieser Strahlung wächst mit der Geschwindigkeit der Elektronen sehr stark an. Zugleich rückt dabei auch ihr Intensitätsmaximum aus dem sichtbaren Licht über Ultraviolett in den Bereich der Röntgenstrahlen: Dadurch wandelt sich das Synchrotron gewissermassen zu einer Röntgenröhre – deren Strahlungsleistung die einer gewöhnlichen Röntgenröhre jedoch um das Fünfzig- bis Hundertfache übertrifft.

Als solche «Super-Röntgenröhren» stellen Synchrotrone für zahlreiche Forschungszwecke – von der Atom- und Festkörperphysik bis zur Chemie und Molekularbiologie – ein wertvolles Hilfsmittel dar. Da die bestehenden Anlagen nur nebenbei als Strahlungsquellen dienen können, wollen die Max-Planck-Gesellschaft und andere Forschungseinrichtungen demnächst in Berlin ein Synchrotron bauen, das speziell für die Anwendung der Synchrotron-Strahlung gedacht ist (Schweiz. Bauzeitung, Heft 19, 1978).

Am DESY steht für solche «Nebenzwecke» schon seit längerem ein Strahlenlabor zur Verfügung, das vom *European Molecular Biology Laboratory* (EMBL) eingerichtet wurde, und das auch von den Wissenschaftlern anderer Institute benutzt wird. *Kenneth C. Holmes,* Geschäftsführender Direktor des Instituts, *Roger Goody* und *Hans Georg Mannherz* untersuchen dort – gemeinsam mit *Gerd Rosenbaum* vom EMBL – die molekularen Prozesse, die der Muskelbewegung zugrundeliegen.

Kurze Belichtungszeiten

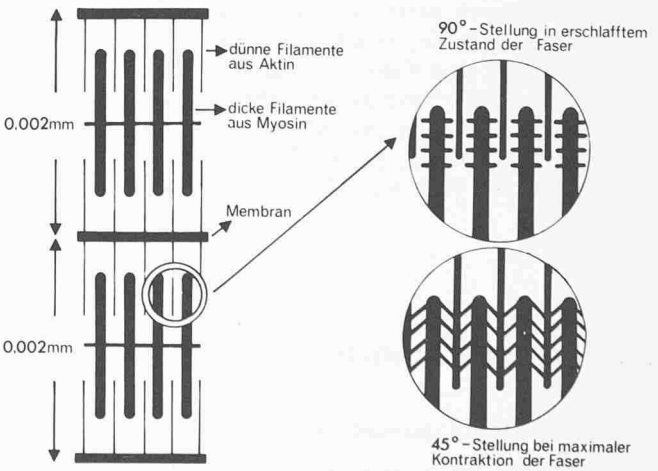
Es geht dabei um *Röntgen-Strukturanalysen,* ursprünglich ein Verfahren der Kristallographie, das man schon seit längerem auch verwendet, um den Bau *organischer Makromoleküle* aufzuklären: Diese Moleküle werden mit Röntgenstrahlen «beleuchtet», die an ihnen gebeugt und dann auf einem Film aufgefangen werden; man erhält so ein *Beugungsbild,* aus dem sich der Bau des fraglichen Moleküls rekonstruieren lässt.

Mit herkömmlichen Röntgenröhren durchgeführt, erfordern solche Strukturanalysen allerdings Belichtungszeiten von vielen Stunden. «Das spielt, solange es nur um rein statische Analysen an einzelnen Molekülen geht, keine Rolle», erläutert Holmes. «Im Fall der molekularen Muskeltätigkeit liegen die Dinge jedoch anders. Hier nämlich handelt es sich um dynamische Prozesse, also darum, die Bewegung und Wechselwirkung von makromolekularen Strukturen aufzuklären: Um diese Vorgänge in einzelnen Phasen festzuhalten, benötigt man möglichst kurze Belichtungszeiten – und dementsprechend intensive Röntgenstrahlung, wie sie nur ein Synchrotron liefert.»

Die Untersuchungsobjekte der Heidelberger Biologen sind isolierte Muskelfasern aus dem Flugmuskel der Riesen-Wasserwanze *Lethocerus maximus.* Diese Fasern, die den Muskel in seiner Längsrichtung durchziehen, gleichen in ihrem Feinbau ganz denen des menschlichen Skelettmuskels: Sie bestehen aus kettenartig aneinandergereihten Elementen, den Sarkomeren, die jeweils zwei tausendstel Millimeter lang sind und über Membranen aneinandergrenzen.

Gleitende Filamente

Die Sarkomere stellen die kleinsten Arbeitseinheiten eines Muskels dar. Sie enthalten in ihrem Innern zwei Sorten von Filamenten, von fadenförmigen Strukturen unterschiedlicher Dicke, die parallel zur Achse des Sarkomers und damit zur Richtung der Muskelfaser verlaufen. Die dünneren dieser Filamente ragen als Bündel – etwa den Borsten eines Pinsels vergleichbar – von den Membranen aus ins Innere des Sarkomers: Dort schieben sie sich mit ihren Enden zwischen



Links: Schematischer Längsschnitt durch zwei Sarkomere mit ineinanderragenden Bündeln aus dünnen und dicken Filamenten. Rechts oben ein Ausschnitt aus der Kontaktzone: In erschlafftem Zustand der Muskelfaser ragen die Köpfe der Myosin-Moleküle senkrecht aus den dicken Filamenten heraus. Diese Köpfe binden sich auf Nervensignale hin an die dünnen Filamente, spalten den «Brennstoff» ATP – Adenosintriphosphat – und klappen in eine 45°-Stellung um. Dabei ziehen sie, wie im Schema unten rechts, die dünnen Filamente an sich vorbei