Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 89 (1971)
Heft: 2

Artikel: Luftfremdstoffemission von Flugzeugstrahltriebwerken
Autor: Schiantarelli, E.F.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84731

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

89. Jahrgang Heft 2 SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG 14. Januar 1971
HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

Luftfremdstoffemission von Flugzeugstrahltriebwerken

DK 656.7:628.511.123

Von **E. F. Schiantarelli**, Zürich

Einleitung

Verkehrsflugzeuge mit Strahltriebwerken ziehen zum Teil beim Start und bei der Landung Rauchfahnen hinter sich her. Diese Erscheinung, die durch Russteilchen im Abgasstrahl verursacht wird, hat seit der Einführung von Verkehrsflugzeugen mit Strahlantrieb im Jahre 1958 Beachtung gefunden. Es stellten sich dabei in erster Linie folgende Fragen:

- Welche luftfremden Stoffe werden durch Strahltriebwerke in die Atmosphäre gebracht (Gase/Feststoffe)?
- Enthalten die Abgase störende oder gesundheitsschädliche Anteile?
- In welchen Mengen werden luftfremde Anteile erzeugt und in welchem Verhältnis zu den Abgasmengen des Motorfahrzeugverkehrs, der Industrie, der Haushaltheizungen usw. fallen sie an?

In der Folge sei auf einige im Ausland und in der Schweiz durchgeführte Studien hingewiesen, die sich mit diesem Fragenkomplex befassten. Alle Angaben in diesem Rahmen beziehen sich ausschliesslich auf die Zivilfliegerei, ohne Berücksichtigung der militärischen und industriellen Anwendungen von Strahltriebwerken.

Ausländische Studien

Die Untersuchungen in *Los Angeles* im Jahre 1960 (Air Pollution Central District/County of Los Angeles) wurden zu einer Zeit durchgeführt, als noch keine Doppelstromtriebwerke im Betrieb waren (zur Erhöhung der Startleistung wurde damals Wasser eingespritzt). Diese veralteten Triebwerke erzeugten einen schwarzen Rauch, der in solchem Ausmass heute – von Ausnahmen abgesehen – nicht mehr zu beobachten ist. Die sehr ausführliche Studie kommt zum Schluss, dass der Emissionsanteil der Strahlflugzeuge nur ganz geringfügig zur Luftverschmutzung beiträgt und dass keine Verletzung des «California State Health and Safety Code» vorliegt. Hingegen sind die schwarzen Rauchschwaden ästhetisch störend, und der Bericht empfiehlt Untersuchungen zur Verminderung der Rauchemission durch Änderungen an Triebwerken oder am Treibstoff.

Im Jahre 1964 unternahm die gleiche Behörde in Los Angeles wegen des mittlerweile stark angestiegenen Luftverkehrs eine Folgestudie. In diesem Jahr zählte man durchschnittlich täglich 7700 Flüge auf den Flugplätzen innerhalb der «Los Angeles County» (Verkehr, Sport und Militär). Auf Grund der Abgaswerte, die in der Studie von 1960 ermittelt wurden und die somit die Verbesserung durch die Einführung der Doppelstromtriebwerke nicht enthält, konnten die folgenden Emissionsanteile ermittelt werden: Flugzeuge erzeugten 1,2% der Kohlenwasserstoffe und anderer organischer Gase, 10,4% der Aerosole (Rauch), 1,8% der Stickstoffoxyde und 1,6% des in der Atmosphäre vorhandenen Kohlenmonoxyds.

Eine erste Studie in *New York* (U.S. Public Health Service, 1964) befasste sich mit der Luftverschmutzung in der Umgebung des Flughafens John F. Kennedy International. Es zeigte sich, dass ein überaus geringer Anteil an Feststoffen, Kohlenwasserstoffen und Geruchkomponenten aus Flugzeugabgasen stammte. Die zweite New-Yorker Untersuchung (U.S. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service, 1967/68) für das Gebiet der «New York Metropolitan Area» mit den drei Flughäfen *John F. Kennedy, La Guardia* und *Newark* setzte nunmehr diesen Anteil auf weniger als 1% fest (vgl. Tabelle 1).

Während fünf Monaten in den Jahren 1967 und 1968 wurde vom National Center for Air Pollution Control die Emission aller Flugzeugtypen untersucht, welche die drei Hauptflughäfen von Washington, D.C., benützten. Die Überwachung zeigte, dass Flugzeuge nur zu etwas mehr als 1% am Anteil von festen Partikeln und Kohlenwasserstoffen und zu weniger als 1% des Kohlenmonoxyds und der Stickstoffoxyde der insgesamt in die Atmosphäre gelangenden Verunreinigungen beteiligt sind. Kolbenmotorflugzeuge scheiden viel Kohlenmonoxyd aus, während die Strahlflugzeuge hauptsächlich am Rauchanteil (Kohlenstoffpartikel) beteiligt sind.

Die Verhältnisse in der Schweiz

Die Verhältnisse im Gebiet des Flughafens Zürich-Kloten waren Gegenstand von Messungen im Jahre 1968. Die *Arbeitsgruppe für Lufthygiene*, die aus Vertretern des Eidg. Luftamtes, des Amtes für Luftverkehr des Kt. Zürich und der Swissair besteht, legte seinerzeit hierfür ein Untersuchungsprogramm fest. Mit den Messungen wurde die Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) betraut. Die heute vorliegenden Gutachten betreffen:

- Luftfremdstoffemission von Strahltriebwerken (verschiedene Triebwerktypen, z.T. mit verschiedenartigen Brennkammern unter Verwendung von Treibstoff mit und ohne Beigabe von verbrennungsfördernden Zusätzen; alle Messungen wurden auf dem Triebwerkprüfstand der Swissair durchgeführt)
- Ausmass des Rauch/Staubniederschlags in der Umgebung des Flughafens Zürich (Messungen während 19 Wochen an 22 Messorten in der Flughafengegend).

Tabelle 1. Ergebnisse einer Studie des U.S. Dept. of Health, Education and Welfare, Public Health Service, über Luftverschmutzung für das Gebiet der New York Metropolitan Area (1967/68)

Herkunft der Emission	Emission in t/Jahr				
	Kohlenmonoxyd	Stickstoffoxyde	Kohlenwasserstoff	Aldehyde	Feststoffe
Flugzeuge mit Strahlantrieb	2 650	1 510	2 610	240	830
Alle Emissionsquellen zusammen	5 299 000	770 000	1 419 000	28 000	243 000
Anteil der Flugzeuge (in %)	0,1	0,2	0,2	0,8	0,3

Tabelle 2. Ergebnisse von Abgasmessungen am Triebwerkprüfstand der Swissair in Zürich-Kloten [2])
(Zusammenfassung der EMPA-Berichte Nr. 61 847 und 66 094)

	Abgasmenge gesamt in 10^3 lbs/h	Kohlendioxyd in 10^3 lbs/h	Kohlenmonoxyd in lbs/h	Stickstoffmonoxyd in lbs/h	Stickstoffdioxyd in lbs/h	Formaldehyd in lbs/h	Schwefeldioxyd in lbs/h	Kohlenwasserstoffe in lbs/h	Feststoffe (Russ) in lbs/h
Triebwerk JT-8D 657 020									
a) *Betrieb mit Kerosen ohne Zusatz:*									
Leerlauf	123	2,7	64	0,8	0	0,3	<0,3	<0,2	1,1
Reiseleistung	473	19	37	4,6	4,1	0,5	<1,0	<0,4	48
Startleistung[1])	638	20	40	5,1	1,1	0	<1,5	<0,6	43
b) *Betrieb mit Kerosen mit 1‰ C1–2:*									
Leerlauf	134	2,9	69	1,1	0	0,2	<0,3	<0,1	1,8
Reiseleistung	473	17	41	9,7	4,1	0,5	<1	<0,5	16
Startleistung[1])	638	20	56	26	5,6	0,7	<1,5	<0,6	24
Triebwerk JT-8D 656 988 mit geänderten (rauchlosen) Brennkammern									
a) *Betrieb mit Kerosen ohne Zusatz:*									
Leerlauf	102	1,9	51	0,4	0,7	0,3	nicht gemessen		1,4
Reiseleistung	530	20	21	28	13	1,8	nicht gemessen		6,1
Startleistung[1])	592	23	19	49	19		nicht gemessen		7,7
b) *Betrieb mit Kerosen mit 1‰ C1–2:*									
Leerlauf	102	2,8	55	1,1	0,8	0,5	nicht gemessen		1,6
Reiselesitung	530	20	21	39	17	5,6	nicht gemessen		5,3
Startleistung[1])	592	27	19	45	12	12	nicht gemessen		5,2
Triebwerk CJ-805-23B 175 214									
a) *Betrieb mit Kerosen ohne Zusatz:*									
Leerlauf	134	3,0	72	0,9	0,5	0,2	<0,3	<0,1	2,4
Reiseleistung	792	17	38	18	5,5	0,8	<1,8	<0,8	28
Startleistung[1])	967	21	37	40	6,8	1,0	<2,2	<0,9	34
b) *Betrieb mit Kerosen mit 1‰ C 1–2:*									
Leerlauf	113	3,6	76	0,7	0	0,2	<0,3	<0,1	1,9
Reiseleistung	607	16	41	3,8	2,1	0,6	<1,4	<0,6	11
Startleistung[1])	680	21	33	5,1	2,9	0,7	<1,5	<0,7	16

[1]) Die Startleistung wird sowohl auf dem Prüfstand wie auch im Flugbetrieb nur kurzzeitig angewendet (beim Abflug während 1,0 bis 1,5 min)
[2]) Aus Gründen der internationalen Vergleichbarkeit wurden diese Werte von der EMPA in lbs/h angegeben (1 lb = 453,6 g)

Die Ergebnisse (siehe Tabelle 2), die mit den meisten ausländischen Untersuchungen gut übereinstimmen, lassen folgende Schlüsse zu:

1. In Flugzeugstrahltriebwerken findet die Verbrennung bei hohem Luftüberschuss statt. Sie ist daher nahezu vollständig, und über 99% des Treibstoffes werden restlos verbrannt. Nur ein Bruchteil eines Prozents des verbrauchten Kerosens fällt in Form unvollständig verbrannter Anteile an, wovon der grösste Teil aus Kohlenstoffpartikeln besteht. Dieser Anteil genügt jedoch, um den Abgasstrahl startender Flugzeuge und den Ausblas des Triebwerkprüfstandes optisch störend in Erscheinung treten zu lassen.
2. Wegen der hohen Reinheit des verwendeten Treibstoffes treten Asche sowie die als Luftverunreiniger gefürchteten Schwefelverbindungen nur in kaum messbaren Spuren auf. Der Gehalt der Abgase an Stickstoffoxyden, Formaldehyd und Kohlenwasserstoffen bewegt sich ebenfalls in äusserst niedrigen Konzentrationen. Aus Bild 1 ist der grosse Unterschied zwischen den Fremdstoffemissionen eines Flugzeugstrahltriebwerkes und eines Automobilmotors ersichtlich.
3. «Die Untersuchungen des Staub/Rauchniederschlages in einem Gebiet von etwa 28 km² um den Flughafen Zürich» (Bild 2), so heisst es im EMPA-Gutachten, «zeigten einen Staubniederschlag, wie er in einer ländlichen, dichter besiedelten und mässig industrialisierten Gegend ganz allgemein gefunden werden kann. Mit anderen Worten: Es ist in diesem Gebiet die Rauchemission des Flugverkehrs, mengenmässig gesehen, am Staubniederschlag nicht messbar und damit bloss unwesentlich beteiligt gewesen.» Die *Messwerte* liegen, bis auf zwei Ausnahmen, unter 100 mg/m² · d. Die leicht erhöhte Staubbelastung an jener Stelle rührt jedoch nicht vom Flugverkehr her, sondern ist eine Folge der dort während den Messungen vorgenommenen Erdbewegungen und der Benützung dieser Gegend zu Truppenübungen mit Motorfahrzeugen. Die Menge des Staubniederschlages ist vergleichsweise als bescheiden zu bezeichnen. In der Bundesrepublik Deutschland, wo offiziell festgelegte Grenzwerte für den Staubniederschlag bestehen, gelten folgende Werte als «noch zulässig» [1]:

a. Allgemein
als Jahresmittel 420 mg/m² . d
als Monatsmittel 650 mg/m² · d

b. In industriellen Ballungsgebieten
als Jahresmittel 850 mg/m² · d
als Monatsmittel 1300 mg/m² · d

Der Gasstrahl eines DC-9-Triebwerkes (JT-8D) bei Startleistung

Die Startleistung wird beim Start während 1 bis 1,5 min benötigt. Bei der Messung entwickelte dieses Triebwerk einen Schub von 5890 kp, der Treibstoffverbrauch lag bei 0,950 kg/s und der gesamte Luftdurchfluss betrug 136 kg/s. Aus den Messwerten im EMPA-Bericht Nr. 61 847 lassen sich folgende Befunde ermitteln:

1. Der gesamten durch das Triebwerk strömenden Luftmasse werden etwa 2 Gewichtsprozent in Form von Sauerstoff entnommen. 98 Gewichtsprozent der angesaugten Luft

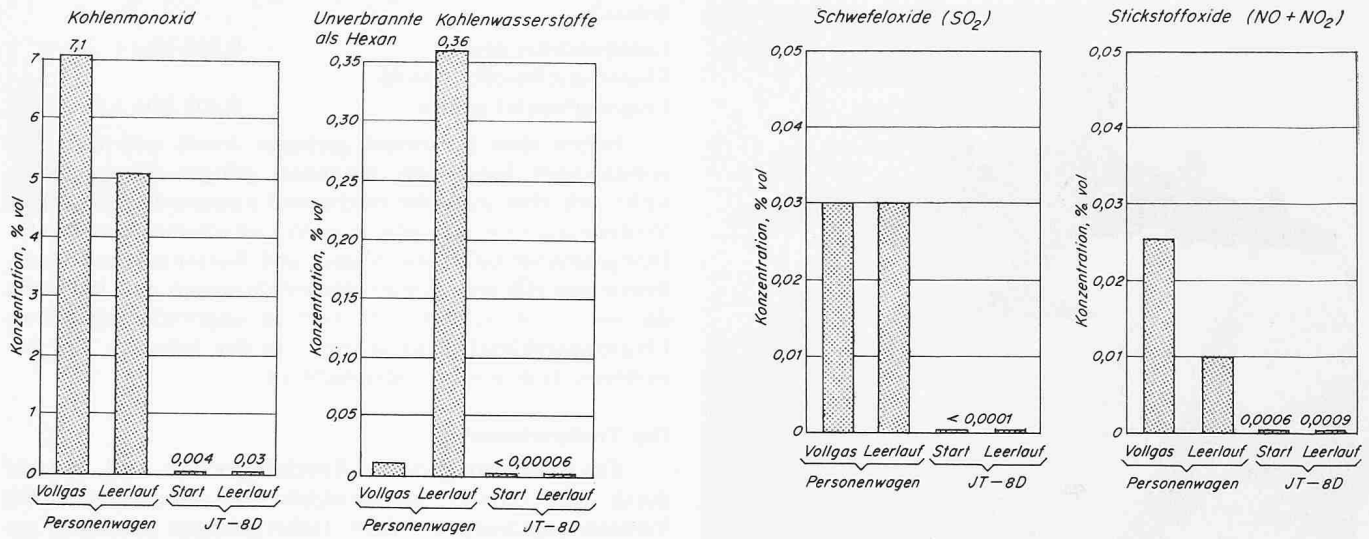

Bild 1. Vergleich zwischen Abgasbestandteilen eines typischen englischen Personenwagens und eines DC-9-Triebwerkes (Pratt & Whitney JT-8D). Quellen: Personenwagen «SAE-Journ.» 77 (1969), Nr. 6; Triebwerk JT-8D EMPA-Bericht Nr. 61 847 / 1968

(hauptsächlich aus Stickstoff und Sauerstoff bestehend) verlassen das Triebwerk unverändert.

2. Die 2 Gewichtsprozent Sauerstoff reagieren mit dem Kerosen und bilden die Hauptverbrennungsprodukte:
   - Kohlensäure (CO_2) : 2,16 Gewichtsprozent des gesamten Luftdurchflusses
   - Wasserdampf (H_2O) : 0,99 Gewichtsprozent des gesamten Luftdurchflusses.

Alle diese Anteile sind in der sauberen Atmosphäre vorhanden und tragen nicht zur Luftverschmutzung bei.

3. Die luftfremden Stoffe (Emission) in Gewichtsprozent des gesamten Luftdurchflusses wurden wie folgt ermittelt:

– Feststoffe	:	0,004 %
– Kohlenmonoxyd	:	0,0037 %
– Stickstoffmonoxyd	:	0,00047 %
– Stickstoffdioxyd	:	0,00011 %
– Formaldehyd	:	nicht messbar
– Schwefeldioxyd	:	< 0,00015 %
– Kohlenwasserstoffe	:	< 0,00006 %

Bild 2. Mittlerer Staubniederschlag in mg/m² · Tag in der Umgebung des Flughafens Zürich-Kloten. Messzeit 2. Juli bis 8. November 1968. Kartenmassstab 1:50 000 (Veröffentlicht mit Bewilligung der Eidg. Landestopographie vom 1. Dezember 1970)

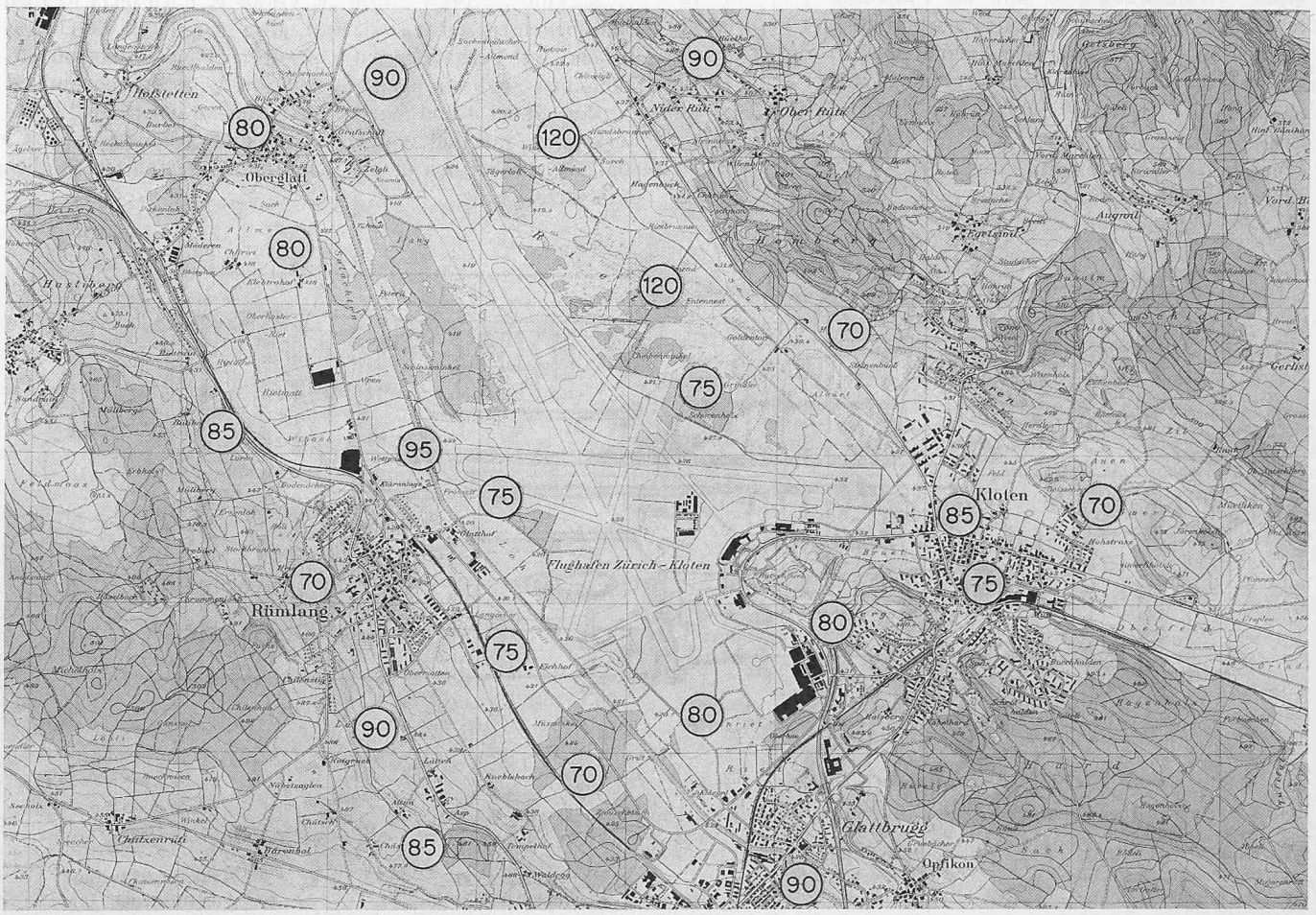

Bild 3. Beim Start treten die Feststoffpartikel im Triebwerksabgas optisch stark in Erscheinung (hier eine Convair 990 Coronado)

Die giftigen Stoffe, die als Bestandteile der Abgase von Fahrzeugmotoren und Ölfeuerungen die Lufthygiene beeinträchtigen, sind somit im Abgas der Strahltriebwerke nur in äusserst geringen Konzentrationen feststellbar.

Problematischer ist der Feststoffanteil (Kohlenstoffpartikel). Er ist zwar am Boden nicht nachweisbar, und es fehlen ihm auch die gesundheitsschädlichen Komponenten (z.B. des Dieselrauches), doch tritt er optisch störend in Erscheinung (vgl. Bild 3).

An der gesamten weltweiten Belastung der Atmosphäre durch Verbrennungsgase sind die Flugzeuge ebenfalls nur schwach beteiligt. Dies ergibt sich schon aus der Verbrauchsstatistik des Jahres 1968 von Erdölprodukten, die ja bis auf den geringen Schmierölanteil verbrannt werden:

weltweit:

Erdölprodukte gesamt	1921,3 Mio t
Flugzeugtreibstoffe (einschl. Flugzeugbenzin) gesamt	41,8 Mio t = 2,18%

Schweiz:

Erdölprodukte gesamt	9,839 Mio t
Flugzeugtreibstoffe (einschl. Flugzeugbenzin) gesamt	0,403 Mio t = 4,1%

Neben dem prozentual geringen Anteil und dem fast vollständigen Fehlen der besonders giftigen Komponenten wirkt sich aber auch die rasche und ausserordentlich starke Verdünnung in einem sehr grossen Luftvolumen positiv aus. Demgegenüber fallen die Abgase und Russanteile aus Hausfeuerungen (Öl und Kohle), Motorfahrzeugen und Industrie, die mit einem schlechteren Verbrennungswirkungsgrad als Flugzeugstrahltriebwerke arbeiten, in der bebauten und bewohnten, bodennahen Luftschicht an.

Der Triebwerkrauch

Die Lufttrübung, die als Rauch bezeichnet wird, entsteht durch fein verteilte Kohleteilchen, die sich während des Verbrennungsprozesses bilden. Dabei genügen schon sehr geringe Mengen, um sichtbaren Rauch zu erzeugen. Nach [5] und [10] bestehen die Partikel zu über 96% aus Kohlenstoff und enthalten, im Gegensatz zum Dieselrauch, höchstens unbedeutende Mengen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen oder Benzpyren. Die Partikel haben kugelförmige Gestalt und eine Grösse von 0,01 bis 1,0 µm.

Das Grössenspektrum der Teilchen begünstigt eine sehr wirksame Lichtbrechung und Lichtabsorption, womit sich der starke Lufttrübungseffekt, der bereits durch eine sehr geringe Konzentration erzeugt wird, erklären lässt. *J. J. Faitani* [10] erwähnt auch, dass der Kohlenstoffgehalt des Abgasstrahles im Verhältnis 1 : 10 variieren kann, ohne dass sich die Opazität sichtbar verändert.

Über die verschiedenen möglichen Reaktionen, nach denen bei der Verbrennung Kohlenstoffteilchen entstehen können, wird in mehreren Publikationen berichtet (siehe Verzeichnis in [10]). Obwohl die Vorgänge noch nicht in allen Einzelheiten erklärbar sind, liegt, grob betrachtet, die Hauptursache im Vorhandensein von überreichen Treibstoffluftgemischen an bestimmten Stellen des Verbrennungsraumes.

Die Bilder 4 und 5 zeigen den Aufbau der beiden Triebwerktypen Pratt und Whitney JT-8D und General Electric CJ 805-23B, die bei den in der Schweiz durchgeführten Studien untersucht wurden.

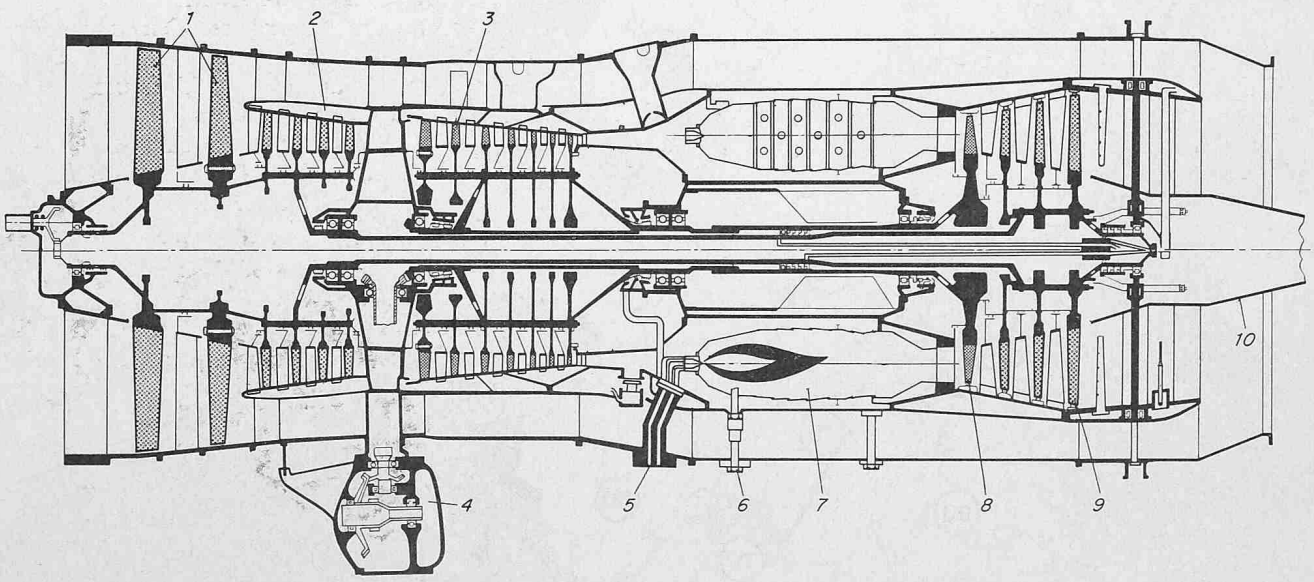

Bild 4. Schematischer Längsschnitt durch das Pratt & Whitney-Bläsertriebwerk Typ JT-8D

1 Bläserbeschaufelung	4 Hilfsgeräteantrieb	7 Brennkammer	9 Niederdruckturbine
2 Niederdruckverdichter	5 Brennstoffzuführung	8 Hochdruckturbine	10 Austrittskegel
3 Hochdruckverdichter	6 Zündkerze		

Die Verbrennung, und dabei auch die Bildung der unerwünschten Rauchpartikel, verläuft in den Brennkammern, wo der Treibstoff in die heisse, verdichtete Luft eingespritzt wird. Dabei sollen möglichst feine Tröpfchen entstehen, die rasch verdampfen und ein Brennstoffdampfluftgemisch bilden, welches mit konstanter Flamme verbrennt. Die Brennkammerwände müssen durch besonders zugeführte Luft gekühlt und gegen einen direkten Kontakt mit den heissen Flammgasen geschützt werden. Die in den Brennkammern vorhandenen Strömungen bewirken, dass ein Treibstoffteilchen von der Düse bis zum Austritt aus der Brennkammer einen Weg zurücklegt, der etwa der 2½- bis 3fachen Länge der Brennkammer entspricht. Die Bemühungen der Triebwerk-Hersteller konzentrieren sich auf die Erforschung der Vorgänge und Einflüsse, die sich durch Konstruktionsänderungen an Einspritzdüsen und Einspritzbedingungen, Brennkammerformen und Strömungsverhältnissen variieren lassen. Der Aufwand für solche Untersuchungen ist sehr beträchtlich, und es ist zu berücksichtigen, dass alle Änderungen auch das Betriebsverhalten und z.T. die Flugsicherheit beeinflussen können. Insbesondere dürfen das Zündverhalten, die Zündung in grossen Flughöhen, die Stabilität der Verbrennung, die Rückstandsbildung, die Temperaturverteilung, der Verbrennungswirkungsgrad und die Lebensdauer der Komponenten nicht nachteilig verändert werden.

Die von den Triebwerk-Herstellerwerken durchgeführten Untersuchungen weisen Wege zu konstruktiven Verbesserungen, die nun laufend bei Triebwerkneukonstruktionen berücksichtigt werden.

Wie sich z.B. geänderte Brennkammern in JT-8D-Triebwerken im Betrieb auf einem DC-9-Flugzeug auswirken, zeigen die Bilder 6a und 6b. Eine Anzahl so ausgerüsteter Triebwerke befindet sich seit dem Herbst 1968 versuchsweise im Linienbetrieb bei mehreren Fluggesellschaften. Die Swissair hat sich als einzige nichtamerikanische Gesellschaft an diesen Versuchen beteiligt.

Rauchverminderung durch Brennstoffzusätze

Organische Manganverbindungen (z.B. Methyl-cyclopentadienyl-mangan-tricarbonyl der Ethyl Corporation) haben sich in geringen Konzentrationen als wirksame Verbrennungsförderer in Kesselfeuerungsanlagen und stationären Gasturbinen erwiesen.

Da die Rauchbildung beim Motorenprüfstand der Swissair in Kloten während den Probeläufen frisch überholter Strahltriebwerke für die Umgebung störend in Erscheinung trat, wurden im Herbst 1967 Versuche mit solchen Zusätzen durchgeführt. Die Beurteilung erfolgte visuell und durch Vergleich von photographischen Aufnahmen des aus dem Schalldämpfer austretenden Abgasstrahls. Es ergab sich, dass die Lufttrübung durch Rauch stark von den meteorologischen Bedingungen beeinflusst wird, dass jedoch durch einen Treibstoffzusatz in der Grössenordnung von 0,05 bis 0,1 Volumenprozent Ethyl CI-2 zum Treibstoff die Rauchentwicklung um etwa 90% vermindert wird. Diese Zusatzmenge entspricht einer Mangan-Konzentration von 170 bis 340 mg Mn pro Liter Kerosen. Auf Grund der erzielten Ergebnisse verwendet die Swissair den Zusatz seit Anfang 1968 für Probeläufe im Motorenprüfstand.

Im Gegensatz zu stationären Anlagen sind indessen derartige Additive im Flugbetrieb nur beschränkt verwendbar. Sie dürfen im Dauerbetrieb nicht gebraucht werden, da die Manganverbindungen sich mit der Zeit nachteilig auf die Turbinenschaufeln und damit auf das sichere Funktionieren der Triebwerke auswirken können.

Bei den Abgasuntersuchungen durch die EMPA (vgl. Tabelle 2) wurden alle Messungen unter Verwendung von Treibstoff mit und ohne Verbrennungsfördererzusatz durchgeführt.

Der Zusatz bewirkte bei beiden untersuchten Triebwerktypen eine Verringerung des Feststoffanteils im Abgas auf etwa die Hälfte. Bei den bereits mit unbehandeltem Treibstoff äusserst niedrig liegenden Werten der JT-8D-Triebwerke mit

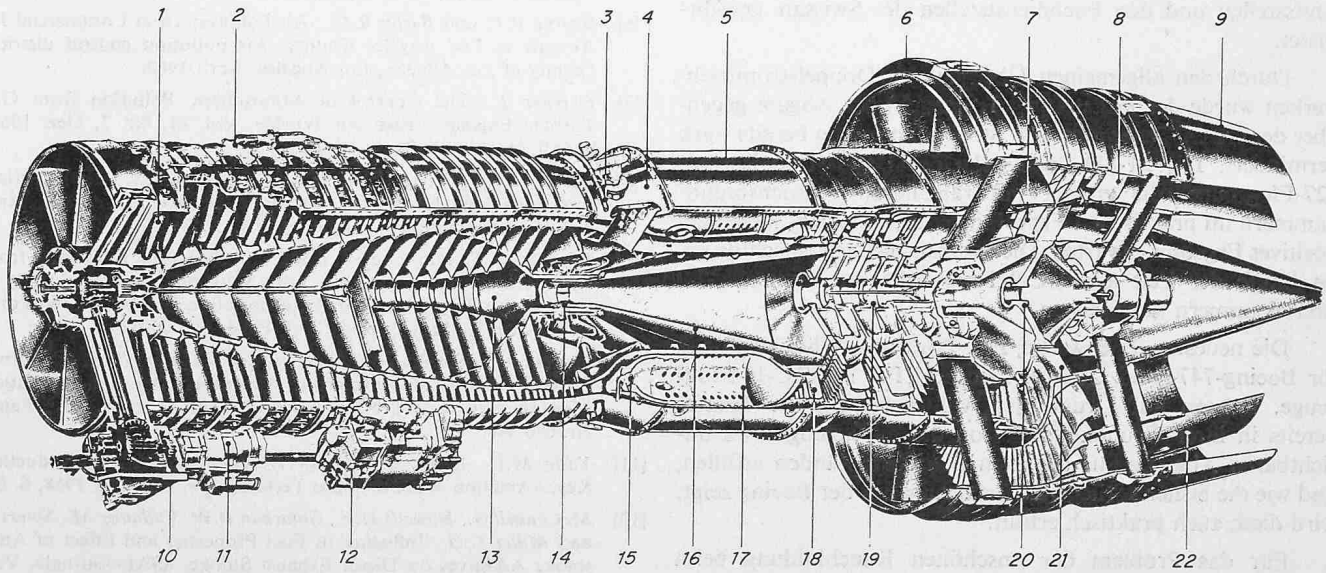

Bild 5. Perspektiv-Schnitt durch das General-Electric-Triebwerk Typ CJ 805-23 B mit hintenliegendem Bläser

1 Eintritts-Leitschaufeln
2 Verstellmechanismus für die Leitschaufeln
3 Verteilring für den Brennstoff
4 Diffusorgehäuse
5 Äusseres Brennkammergehäuse
6 Vorderes Bläsergehäuse
7 Leitschaufelkranz der Bläserturbine
8 Leitschaufelkranz des Bläsers
9 Austrittsdüse der Bläserluft
10 Hilfsgeräteantrieb
11 Brennstoffpumpe
12 Brennstoff-Zumessgerät
13 Verdichter-Rotor
14 Kupplung zwischen Verdichter und Turbine
15 Brennstoff-Einspritzdüse
16 Konische Turbinenwelle
17 Flammrohr
18 Leitschaufelkranz der ersten Turbinenstufe
19 Turbinenrotor (dreistufig)
20 Bläser-Rotor
21 Turbinenschaufeln
22 Haupt-Schubdüse

Bild 6a. Eine Douglas DC-9 mit normalen Triebwerken beim Abflug

Bild 6b. Abfliegende Douglas DC-9. Das rechte Triebwerk ist mit raucharmen Brennkammern ausgerüstet

rauchlosen Brennkammern konnte immer noch eine Verminderung von rund 30% beobachtet werden. In Übereinstimmung mit ausländischen Angaben konnte bei diesen Versuchen festgestellt werden, dass die Sichtbarkeitsgrenze des Abgasrauches meist bei etwa 20 mg/m³ liegt.

Zukunftsaussichten

Behörden und Industrie in der Schweiz wie auch im Ausland kennen das Problem der Luftfremdstoffemission von Flugzeugstrahltriebwerken, wobei festzustellen ist, dass von allen Stellen sehr intensive Anstrengungen zur Verbesserung der heutigen Lage unternommen werden. In der Schweiz ist durch die Arbeitsgruppe für Lufthygiene die Koordination der Aufgaben und die Zusammenarbeit zwischen den zuständigen Amtsstellen und den Fachdienststellen der Swissair gewährleistet.

Durch den allgemeinen Übergang zu Doppelstromtriebwerken wurde der Feststoffgehalt (Rauch) der Abgase gegenüber der ersten Generation von Strahltriebwerken bereits stark vermindert. Die JT-8D-Triebwerke der DC-9- und Boeing-727-Flugzeuge, die zurzeit mit rauchlosen Versuchsbrennkammern im praktischen Erprobungsbetrieb laufen, lassen ein positives Ergebnis erwarten. Die Swissair hat sich entschlossen, im Laufe der Zeit alle DC-9-Triebwerke mit «rauchlosen» Brennkammern auszurüsten.

Die neuesten Triebwerke, z.B. Pratt und Whitney JT-9D für Boeing-747- und General Electric CF-6 für DC-10-Flugzeuge, müssen auf Grund der Anforderungen der Käufer bereits in ihrer Grundkonstruktion die Bedingung eines unsichtbaren Abgasstrahls bei allen Betriebszuständen erfüllen, und wie die bisher vorliegende Erfahrung mit der Boeing zeigt, wird diese auch praktisch erfüllt.

Für das Problem der unschönen Rauchbildung beim Betrieb von Strahlflugzeugen ist daher eine *technische Lösung* möglich.

Für Prüfstandläufe konnte in organischen Manganverbindungen, die als Treibstoffzusatz verwendet die Verbrennung durch katalytische Wirkung verbessern, ein gutes Mittel zur weitgehenden Verhinderung der Rauchbildung gefunden werden. Die Beigabe dieses Additives wird sich erübrigen, wenn nur noch rauchlose Triebwerke zur Prüfung anfallen.

Literaturverzeichnis

[1] *Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt EMPA:* «Ausmass des Rauch/Staub-Niederschlags in der Umgebung des Flughafens Zürich». EMPA-Bericht Nr. 61 371 vom 27. Febr. 1969.

[2] *Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt EMPA:* «Messung der Luftfremdstoff-Emission von Strahltriebwerken». EMPA-Bericht Nr. 61 847 vom 27. Nov. 1968.

[3] *Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt EMPA:* «Messung der Luftfremdstoff-Emission von Strahltriebwerken, Triebwerk JT-8D-7 mit modifizierten Brennkammern». EMPA-Bericht Nr. 66 094 vom 20. Februar 1969.

[4] *Sallee G.P.:* A Status Report on Jet Exhaust Emission. Air Transport Association of America, Washington, D.C., Dez. 1967.

[5] *Durrant T., Fiorello S.C., Faitani J.J., Hochheiser S.* und *Lozano E.R.:* Combustor Design Changes Reduce Smoke from Gas Turbine Engines. «SAE-Journal», Vol. 77, Nr. 6, June 1969, S. 61 ff.

[6] *George R.E.* und *Burlin R.M.:* Air Pollution from Commercial Jet Aircraft in Los Angeles County. Air pollution control district/County of Los Angeles, Los Angeles, April 1960.

[7] *Durrant T.:* The Control of Atmospheric Pollution from Gas Turbine Engines. «Esso Air World», Vol. 21, Nr. 3, Dez. 1968, S. 65 ff. (nach SAE-Paper Nr. 680347).

[8] *Lozano E.R., Melvin W.W.* Jr. und *Hochheiser S.:* Air Pollution Emissions from Jet Engines. Journal of the Air Pollution Control Association, Vol. 18, Nr. 6, June 1968, S. 392 ff.

[9] *Hochheiser S.* und *Lozano E.R.:* Air Pollution Emissions from Jet Aircraft Operating in New York Metropolitan Area. Society of Automotive Engineers, Air Transportation Meeting New York, N.Y. April 29–May 2, 1968. SAE-Paper Nr. 680339.

[10] *Faitani J.J.:* Smoke Reduction in Jet Engines Through Burner Design. Society of Automotive Engineers, Air Transportation Meeting New York, N.Y. April 29–May 2, 1968. SAE-Paper Nr. 680 348.

[11] *Yaffe M.L.:* Better Combustor Design Seems Smoke-Reduction Key. «Aviation Week & Space Technology», May 13, 1968, S. 65.

[12] *McConnell G., Howells H.E., Golothan D.W., Vulliamy M., Spiers J.* und *Miller C.O.:* Influence of Fuel Properties and Effect of Anti-smoke Additives on Diesel Exhaust Smoke. «SAE-Journal», Vol. 76, Nr. 3, S. 36 ff.

[13] *SAE Panel on Electrically Powered Vehicles:* Air Pollution – the Problem and the Risks. «SAE-Journal», Vol. 76, Nr. 5, May 1968, S. 47 ff.

[14] *Högger D.:* Bekämpfung von Luftverunreinigungen (Rechtsgrundlagen und Rechtsanwendung). «Neue Zürcher Zeitung» Nr. 663, 27. Okt. 1968.

[15] «Über die Luftverunreinigung der Atmosphäre durch Rauch und Abgase aus Heizanlagen». Vorträge der Tagung vom 26. und

27. Sept. 1962, veranstaltet von der Eidg. Kommission für Lufthygiene. «Industrielle Organisation», *31* (1962), Nr. 11, S. 325ff.

[16] *Brunner M.:* Die Zusammensetzung der Auspuffgase bei Benzinmotoren (Der Einfluss der Treibstoffzusammensetzung). «Zeitschr. für Präventivmedizin» *1966*, Heft 2, S. 77ff.

[17] *Wiethaup H.:* Die rechtliche Seite der Luftverunreinigung durch den Hausbrand. «Staub», Vol. 25, Nr. 3, März 1965.

[18] *Liesegang W.:* Der Flugascheauswurf vom Standpunkte des Nachbarschutzes. «Staub» *1953*, Heft 31, S. 29ff.

[19] *Hess W.:* Emissionen aus Ölfeuerungen in Zürich. «Staub», Vol. 25, Nr. 11, November 1965.

[20] *Sawyer R.F.:* Fundamental Processes Controlling the Air Pollution Emissions from Turbojet Engines. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 6th Annual Meeting, Anaheim, California, October 20–24, 1969. AIAA-Paper Nr. 69-1040.

Adresse des Verfassers: *E. F. Schiantarelli*, dipl. Chemiker, Leiter der Abt. Materialprüfung und Verfahren, Swissair, Schweiz. Luftverkehr AG, 8058 Zürich-Flughafen.

DK 661:621.315.59

Siliziumkarbid als Halbleitermaterial

Seit der Erfindung des Transistors durch Shockley im Jahr 1947 haben Halbleiterbauelemente immer grössere Bedeutung erlangt und zu einer stürmischen Entwicklung vor allem der Nachrichten-, aber auch der Starkstromtechnik geführt. Die Grundlagen zu dieser Entwicklung lieferte die Erforschung der Eigenschaften der verwendeten Halbleitermaterialien, d. h. zunächst des Germaniums und später des Siliziums. Die Eigenschaften eines Halbleiterbauelementes sind durch das verwendete Halbleitermaterial bestimmt. Die Erforschung weiterer Materialien ist daher der Schlüssel zur Entwicklung von Baulementen mit besseren oder ganz neuen Eigenschaften.

Zu den Materialien, die neue technische Anwendungen versprechen, gehört das Siliziumkarbid (SiC). Seine hervorstechenden Eigenschaften sind seine hohe Temperaturbeständigkeit, die grosse Breite seiner verbotenen Zone, seine chemische Beständigkeit und seine Härte. Um die Halbleitereigenschaften eines Materials auszunutzen, muss man es in einkristalliner Form und in äusserster Reinheit herstellen. Die gleichen Eigenschaften, die SiC gegenüber anderen Halbleitermaterialien auszeichnen, insbesondere seine Temperaturbeständigkeit, bedingen für die Herstellung genügend reiner Einkristalle aus SiC einen erheblichen Aufwand. SiC-Einkristalle werden aus hochreinem polykristallinem SiC durch Umsublimation (SiC lässt sich nicht schmelzen) bei 2500 ° C unter niederem Druck gezogen. Es werden so höhere Reinheiten als 1 ppm (ein Verunreinigungsatom auf 10^6 Si- und 10^6 C-Atome) erzielt.

Eine andere Möglichkeit, sehr reine Einkristalle aus SiC zu erhalten, stellt die Epitaxie aus der Gasphase dar. Das Kristallwachstum lässt sich dabei besser beherrschen, weil es bei nicht so hohen Temperaturen erfolgt. Dieses Verfahren wird im Brown-Boveri-Konzern-Forschungszentrum benutzt, um *p-n*-Übergänge zu erhalten. Ein *n*-dotierter SiC-Einkristall wird in einer Wasserstoffatmosphäre auf 1750 ° C erhitzt. Dem Wasserstoff werden geringe Mengen von kohlenstoff-, silizium- und borhaltigen Gasen beigemischt, die sich bei der hohen Temperatur zersetzen. Dabei wächst auf dem Grundkristall (Substrat genannt) eine *p*-dotierte SiC-Schicht einkristallin auf. Mit diesem Verfahren erhielt man Dioden, die bei Zimmertemperatur bis zu 500 V sperren und bis zu Temperaturen von 500 ° C gleichrichten. Mit solchen Dioden gelang es, α-Strahlen in einem Reaktor bei 400 ° C nachzuweisen.

Mart Stam

Von **Martin Steinmann**, Zürich

DK 92:72

Die folgenden Anmerkungen über die Beziehungen von Mart Stam zur Schweiz wurden als Einführung der Ausstellung Mart Stam in der ETH Zürich gemacht (SBZ 1970, H. 50, S. 1185). Mart Stam lebt zurückgezogen «irgendwo in der Schweiz» und lehnte alle Versuche ab, mit ihm ins Gespräch zu kommen. Die Anmerkungen stützen sich deshalb auf die Mitteilungen von *Hans Schmidt, Werner Moser †* und *Emil Roth*.

Nach dem Ersten Weltkrieg arbeiteten verschiedene schweizerische Architekten für einige Zeit in Holland, das sich aus dem Weltkrieg heraushalten und ohne Unterbrechung durch schwere wirtschaftliche Schädigung die Erneuerung der Architektur weiterführen konnte, welche von Berlage ausging. Die Architektur in der Schweiz stand damals noch unter dem Einfluss der Sechs Bücher vom Bauen von Ostendorf, welche einen betont bürgerlichen Stil vertraten, anlehnend an die nachrevolutionäre Architektur um 1800.

Hans Schmidt arbeitete 1920–22 in Holland, Werner Moser 1922–23, beide eine Zeit zusammen bei Granpré-Molière in Rotterdam, bei welchem Mart Stam 1919–22 angestellt war. Mart Stam vermittelte den beiden Schweizern «viel vom einfachen holländischen Leben, aus welchem er kam» und dadurch von den gesellschaftlichen Grundlagen der neuen Architektur. In Rotterdam standen auch schon die ersten der vorbildlichen Mietshäuser von Oud, welche den städtischen Massenwohnungsbau als entscheidende Aufgabe der Zwanziger Jahre in wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Hinsicht ankündigten.

1922–23 schrieb Mart Stam auf Vermittlung von Hans Schmidt einen längeren Aufsatz über «Holland und die Baukunst unserer Zeit» für die SBZ, welcher in vier Folgen 1923 erschien als erste Arbeit über die Absichten der neuen Architektur[1]). Anlass für die Veröffentlichung war gemäss einem redaktionellen Vorwort «die unverkennbaren Rückwirkungen der holländischen Entwicklung auf die schweizerische Architektur und die daraus erwachsenden Meinungsverschiedenheiten». Solche Rückwirkungen zeigten sich in verschiedenen Wettbewerben in Form von «verschobenen», nicht auf Achsen angelegten Baukörpern, welche auch kurzerhand als «Eisenbahnunglücke» bezeichnet wurden.

Beim Erscheinen der vier Folgen arbeitete Mart Stam in Zürich bei Prof. *Karl Moser* an den Ausführungsplänen für das Haus Rickli an der Herzogstrasse, an welchem sich die Ausbildung der Fenster unschwer als Stams Arbeit nachweisen lässt, vor allem am Vorbau, an welchem Sturz und Brüstung in der Art von Klijnen als schmale Streifen durchgezogen und um die Ecke geführt werden. Zusammen mit seiner Frau bewohnte Stam ein Zimmer im Dachstock des Hauses von Prof. Karl Moser an der Freudenbergstrasse.

Reyner Banham stellt in «Theory and Design of the First Machine Age» den Entschluss von Mart Stam, in der Schweiz zu arbeiten, so dar, dass er dem befreundeten *El Lissitzky* nachgereist sei, welcher 1924–25 in Agra (Tessin) eine Lungentuberkulose ausheilte. Ein Brief von Lissitzky über seine Durchreise in Zürich widerlegt diese Vermutung: «Am Bahnhof Zürich wurde ich von dem grossen Pra – Umkehrung von Arp – in weissen Locken und dem anderthalb Kilometer langen Stam abgeholt», und weiter unten: «Der Stam macht hier Revolution

[1]) SBZ 1923 Bd. 82, H. 15 (S. 185), H. 18 (S. 225), H. 19 (S. 241), H. 21 (S. 268). Daran schliesst sich eine Kontroverse zwischen Arch. *E. Wipf* (H. 24, S. 317) und *Mart Stam* (H. 26, S. 339).