

La manufacture des objectifs
optiques de Zeiss

Industrial Lens
Production at Zeiss

La verrerie moderne (1885-1886)

Modern Glass (1885-1886)

Allain Daigle

Éditorialisation/content curation
Allain Daigle

Traduction/translation
Hélène Buzelin

Référence bibliographique/bibliographic reference
Daigle, Allain. *La manufacture des objectifs optiques de Zeiss / Industrial Lens Production at Zeiss*. Montréal : CinéMédias, 2023, collection « Encyclopédie raisonnée des techniques du cinéma », sous la direction d'André Gaudreault, Laurent Le Forestier et Gilles Mouëllic.

Dépôt légal/legal deposit
Bibliothèque et Archives nationales du Québec,
Bibliothèque et Archives Canada/Library and Archives Canada, 2023
ISBN 978-2-925376-07-1 (PDF)

Appui financier du CRSH/SSHRC support
Ce projet s'appuie sur des recherches financées par le
Conseil de recherches en sciences humaines du Canada.

This project draws on research supported by the
Social Sciences and Humanities Research Council of Canada.

Mention de droits pour les textes/copyright for texts
© CinéMédias, 2023. Certains droits réservés/some rights reserved.
Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International



Image d'accroche/header image
Photographie de l'usine Carl Zeiss à Iéna (Allemagne), vers 1890.
[Voir la fiche.](#)

Photograph of the Carl Zeiss factory in Jena (Germany), circa 1890.
[See database entry.](#)

Base de données TECHNÈS/TECHNÈS database
Une base de données documentaire recensant tous les contenus
de l'*Encyclopédie* est en [libre accès](#). Des renvois vers la base sont
également indiqués pour chaque image intégrée à ce parcours.

A documentary database listing all the contents of the *Encyclopedia*
is in [open access](#). References to the database are also provided for
each image included in this parcours.

Version web/web version
Cet ouvrage a été initialement publié en 2022 sous la forme
d'un [parcours thématique](#) de l'*Encyclopédie raisonnée des
techniques du cinéma*.

This work was initially published in 2022 as a [thematic parcours](#)
of the *Encyclopedia of Film Techniques and Technologies*.

La verrerie moderne (1885-1886)

par Allain Daigle

Traduction : Hélène Buzelin

Comme Kingslake l’a déclaré sur un ton polémique dans un article datant de 1934, l’histoire des objectifs « se divise naturellement en deux parties: la période “ancienne” de 1812 à 1886, et la période “anastigmatique” allant de 1886 à nos jours^[1] ». L’année 1886 n’a pas été marquée par l’invention d’un nouveau type de lentille. Elle correspond plutôt au moment où le Glastechnisches Laboratorium Schott und Genossen (le Laboratoire de recherche sur les techniques verrières Schott & Co) de Zeiss commença à distribuer un verre crown-baryum. Ce verre, ainsi que les nouveaux types de verres produits dans ce laboratoire, se prêtait à de nombreuses applications allant bien au-delà de la microscopie et de la photographie. La verrerie Schott contribua ainsi à faire du verre non plus une simple matière première, mais une véritable technologie.

Le verre optique: la matière devenue technologie

Si Abbe parvint à convaincre les microscopistes des avantages professionnels d’un processus de production basé sur des principes scientifiques, une autre composante devint rapidement indissociable de la qualité des objectifs: le verre brut. En 1876, à l’occasion de l’exposition *The Special Loan Collection of Scientific Instruments* qui se tenait dans le quartier de South Kensington à Londres, Abbe rédigea un rapport passionné sur l’état des connaissances dans le domaine de l’optique. Il regrettait le fait que les opticiens aient à leur disposition une théorie complète et une pratique largement éprouvée – autrement dit, tout ce qu’il fallait, excepté des verres adéquats pour la construction des objectifs^[2]. En effet, les propriétés physiques du verre utilisé dans la fabrication des objectifs limitaient les possibilités des physiciens.

De plus, le marché des instruments scientifiques au milieu du XIX^e siècle était plutôt restreint. Les industries de verre produisaient principalement des vitres et des articles de verre. Par conséquent, ces fabricants n’avaient que « peu de motivation, voire aucun incitatif économique à améliorer la qualité des verres utilisés dans la construction des instruments d’optique^[3] ». Abbe suggéra que les progrès dans l’industrie de la verrerie pourraient servir non seulement à la microscopie, mais à « toutes les sciences et les arts utilisant des appareils optiques^[4] ». Pour lui, la technologie devait répondre à un idéal plus vaste consistant à mettre la science au profit de la société, idéal de changement auquel l’industrie n’offrait aucun écho. Pourtant, grâce au soutien généreux de l’État, Abbe parvint à créer avec Otto Schott le Laboratoire de recherche sur les techniques verrières Scott & Co: la verrerie Schott.

La verrerie Schott

Le rapport d'Abbe publié en 1876 attira l'attention d'Otto Schott, un jeune chimiste qui avait tout juste soutenu une thèse doctorale intitulée « La contribution [des plaques de verre] à la théorie et à la pratique de la verrerie ». Schott conduisait des expériences sur la fonte du verre dans l'atelier de son père^[5]. Après avoir pris connaissance du rapport, il écrivit à Abbe pour lui demander si un nouveau type de verre à base de lithium pourrait avoir des applications optiques. Il lui envoya des échantillons de ce verre expérimental qu'il venait d'inventer et c'est ainsi que s'amorça leur collaboration^[6]. En 1882, Schott s'établit à Iéna. Il abandonna les modestes expériences qu'il menait à Witten pour se lancer dans des expérimentations de plus grande envergure.

Le Glastechnisches Laboratorium Schott und Genossen de Zeiss, fondé en 1884, également connu sous le nom de « Laboratoire de recherche sur les techniques verrières » ou plus simplement « la verrerie Schott », marqua un tournant dans la production des objectifs de précision chez Zeiss. Si Abbe avait instillé, chez les professionnels, une croyance dans la construction scientifique des instruments, le travail de Schott transforma le verre optique en matériau technique : un matériau « avec des spécifications précises et des propriétés reproductibles^[7] ».

La modernisation du verre consista à soumettre le verre à toutes sortes de mesures, à élever ce matériau au rang de technologie. Le verre doté de propriétés techniques particulières – et si possible reproductibles avec fiabilité! – devint un matériau clé non seulement en optique, mais pour « pratiquement toutes les technologies, et donc pour la vie moderne en général^[8] ». Dans ce processus de modernisation de la fabrication du verre, la technologie et la vision devenaient interchangeables. Comme l'ont montré nombre des premiers films à trucs, faire l'expérience de la médiation invisible de la vision et de la nature par le biais de l'objectif était souvent extrêmement révélateur.

Le verre crown-baryum

Une des formules les plus prometteuses de la verrerie Schott fut celle du verre crown-baryum. Ce verre permit la construction de nouveaux types d'objectifs photographiques, car il permettait une ouverture plus large que les objectifs existants combinant des verres crown et flint^[9]. Le principal défi à l'époque provenait du fait que l'on considérait qu'« une large ouverture et un grand angle [de vision] étaient incompatibles^[10] ». En conséquence, la plupart des objectifs existants devaient choisir entre l'aberration chromatique (découlant d'un verre trop bombé) ou l'aberration sphérique (résultant d'un verre insuffisamment bombé). Le verre crown-baryum ne tarda pas à s'imposer dans la construction des objectifs photographiques en raison de « son grand pouvoir de transmission et de son contrôle absolu des aberrations tant chromatiques que sphériques^[11] ». Ce verre, combiné à un verre flint, permettait de corriger simultanément les deux types d'aberrations, sans compromettre la quantité de lumière traversant l'objectif.

Le verre crown-baryum entra dans la composition de l'objectif Anastigmat de Zeiss. (Comme mentionné précédemment, l'adjectif « anastigmatique » est généralement utilisé pour décrire une

classe d'objectifs qui neutralisaient à la fois l'aberration sphérique et l'aberration chromatique. Mais ici, l'appellation « Anastigmat » renvoie au design propre à l'objectif de Zeiss conçu en 1890.) Les propriétés physiques du verre crown-baryum allaient donc permettre aux concepteurs de dépasser ce qui était jusque-là considéré comme une relation stable et immuable entre la lumière et la réfraction.

Les professionnels avaient remarqué qu'en pratique, plus l'ouverture relative de l'objectif était grande, plus les aberrations l'étaient aussi. Cette croyance établie – selon laquelle il y avait une limite inhérente à la possibilité de produire des images à intervalles très rapprochés – avait une incidence profonde sur la capacité des photographes et des scientifiques à capturer des images sur les supports d'enregistrement flexibles qui existaient dans les années 1890. Si la pellicule est souvent considérée comme le matériau de base du cinéma, sans un objectif capable de capturer parfaitement une image tout en laissant passer assez de lumière sur le support d'enregistrement, le cinéma de l'époque aurait sans doute été très différent.

Le verre crown-baryum permit de créer des objectifs sans distorsion, comme l'Anastigmat de Zeiss, alors que nombre des concepteurs de l'époque pensaient qu'une telle réalisation était physiquement impossible. En créant un nouveau type de verre optique, Otto Schott, chimiste chez Zeiss, fut reconnu par la Deutsche Glastechnische Gesellschaft (la Société allemande du verre) comme « le fondateur de la technologie verrière scientifique moderne^[12] ». En en faisant un matériau « technique », Schott permit au verre d'être conçu de façon systématique et utilisé avec fiabilité pour produire des systèmes optiques de précision. Autrement dit, Schott « a élevé l'optique au rang de technologie^[13] ».

Une bonne part du succès de la verrerie Schott tient donc au fait que celle-ci est parvenue à créer de façon fiable et reproductible un nouveau type de verre. En cela, elle répondait à la demande, tant domestique qu'internationale, pour des verres optiques conçus selon une approche scientifique. Au début du XIX^e siècle, les verres optiques de haute qualité provenaient essentiellement des compagnies britanniques Chance Brothers et Taylor, Taylor & Hobson ainsi que du fabricant français Parra-Mantois^[14]. Les opticiens allemands devaient donc importer du verre pour construire leurs instruments. Jusqu'en 1888, l'Allemagne importait quasiment tous ses verres optiques de la Grande-Bretagne^[15]. Sur les plans domestique et international, la verrerie Schott put ainsi répondre à une forte demande pour des applications optiques de plus en plus diversifiées dans les domaines tant scientifiques qu'industriels. D'après une publication datant de 1904, le volume de la production de verre optique était nettement inférieur à la production de verres pour les lampes, les thermomètres et d'autres applications qui nécessitaient un verre capable de résister à des variations importantes et soudaines de température^[16].

Grâce à la verrerie Schott, Zeiss est devenu le principal distributeur international de verres de précision. En 1877, alors que la compagnie n'était encore qu'un atelier, Zeiss employait 36 personnes. En 1891, le nombre grimpa à 500, puis en 1900, l'entreprise comptait plus de 1000 employés. En 1917, au plus fort de la Première Guerre mondiale, l'effectif avait décuplé, Zeiss employant alors plus de 10 000 personnes^[17].

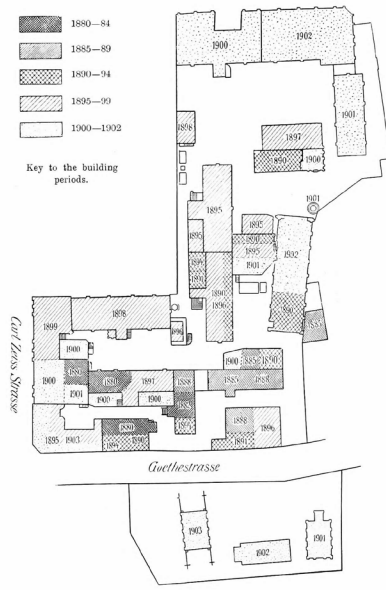


Fig. 86.
Plan showing the development of the Zeiss Works.
La manufacture de Zeiss en 1904.
[Voir la fiche.](#)

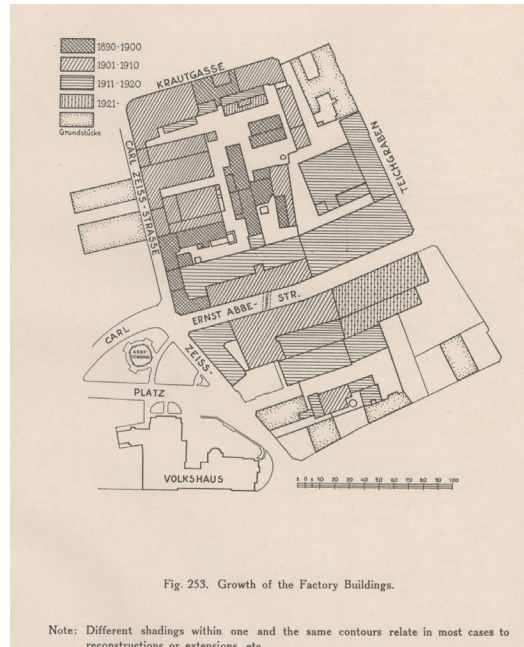


Fig. 253. Growth of the Factory Buildings.
La manufacture de Zeiss en 1927.
[Voir la fiche.](#)

L'atelier est devenu une usine qui fabriquait non seulement des microscopes, mais « la totalité du champ des applications optiques^[18] ». À l'aube du XX^e siècle, l'industrie allemande des instruments de précision comprenait près de 800 entreprises et employait plus de 13 500 personnes. Parmi ces entreprises, 125 étaient spécialisées dans la production de verre^[19].

- [1] « divides itself naturally into two parts, the “old” period from 1812 to 1886, and then the “anastigmat” period from 1886 to the present day ». Rudolf Kingslake, « The Development of the Photographic Objective », *Journal of the Optical Society of America* 24, n° 24 (mars 1934) : 73. Cette division apparaît également dans l'ouvrage de C. B. Neblette et Allen E. Murray, *Photographic Lenses* (Hastings-on-Hudson : Morgan & Morgan, 1965), dont la section consacrée au développement des objectifs photographiques est chapeautée du sous-titre suivant : « Les objectifs photographiques avant l'Anastigmat [Photographic Lenses Before the Anastigmat] ».
- [2] « a fully-developed theory and thoroughly-tested practice—everything, in fact, except suitable glasses for the construction of the necessary lenses ». Felix Auerbach et R. Kanthack, *The Zeiss Works and the Carl Zeiss Foundation in Jena; Their Scientific, Technical and Sociological Development and Importance Popularly Described* (Londres : W. & G. Foyle, 1927), 26.
- [3] « little or no economic incentive to improve the quality of glass used in optical instruments ». David Cahan, « The Zeiss Werke and the Ultramicroscope: The Creation of a Scientific Instrument in Context », dans *Scientific Credibility and Technical Standards in Nineteenth and Early Twentieth Century Germany and Britain*, dir. Jed Z. Buchwald (Dordrecht : Kluwer Academic, 1996), 76.
- [4] « all sciences and arts that need optical appliances ». H. Hovestadt, *Jena Glass and Its Applications to Science and Art* (Iéna : Fischer, 1900), 4.
- [5] Werner Vogel, *Glass Chemistry* (Berlin : Springer-Verlag, 1985 [1994]), 4.
- [6] « Otto Schott Joins the Company: 1879 to 1884 », Zeiss, <https://www.zeiss.com/corporate/int/history/founders/carl-zeiss/otto-schott-joins-the-company.html>.
- [7] « precisely specified and reproducible in its properties ». Peter Hartmann *et al.*, « Optical Glass and Glass Ceramic Historical Aspects and Recent Developments: A Schott View », *Applied Optics* 49, n° 16 (juin 2010) : D159.
- [8] « virtually all technology, i.e., in the end, for modern life in general ». *Ibid.*, D157.
- [9] Comme l'explique Kingslake, la conception d'un objectif photographique est fonction d'une formule mathématique appelée « la somme de Petzval » (ou « courbure de champ »). En termes simples, cette somme correspond à la relation entre la courbure de la lentille et la capacité de celle-ci à laisser passer la lumière sur la plaque photographique. Si elles semblent planes, toutes les images photographiques sont le résultat de l'enregistrement d'un faisceau lumineux.

La courbure de la lentille permet à la lumière de se réfléchir sur la surface photographique de façon aussi uniforme que possible. La lumière voyageant jusqu'au centre de la lentille sera enregistrée plus ou moins directement au centre de l'image photographique. Mais la lumière provenant de l'extérieur de la courbe de la lentille est reflétée à un endroit différent de la lumière projetée au centre. C'est pourquoi les premières photographies étaient souvent nettes au centre de l'image, mais devenaient plus floues sur les bords : la lumière provenant de l'extérieur ne se situait pas sur le même plan focal que la lumière au centre de ces images.

- [10] «high aperture and a wide angular field [of view] were incompatible». Kingslake, *The History of the Photographic Lens*, 5.
- [11] «absolutely clear transmission power and freedom from chromatic and spherical aberrations». E. A. Schiebe, «America's Optical Emancipation», *Purchasing Agent*, 19 juillet 1919 : 14.
- [12] «the creator of modern scientific glass technology». «Technical Note: Centenary Recognition of Dr Otto Schott», *Journal of the Optical Society of America* 42, n° 3 (1952) : 218.
- [13] «allowed optics to become a technology». Hartmann *et al.*, «Optical Glass», D159.
- [14] Stewart Wills, «How the Great War Changed the Optics Industry», *Optics and Photonics News* 27, n° 1 (2016) : 40-47, <https://doi.org/10.1364/OPN.27.1.000040>.
- [15] R. T. Glazebrook, «The Aims of the National Physical Laboratory of Great Britain», *Popular Science Monthly*, décembre 1901, 135.
- [16] Felix Auerbach, *The Zeiss Works and the Carl Zeiss Stiftung in Jena; Their Scientific, Technical and Sociological Development and Importance Popularly Described*, trad. Siegfried F. Paul et Frederic J. Cheshire (Londres : W. & G. Foyle, 1904), 29.
- [17] T. G. Spates, «Industrial Relations in the Zeiss Works», *International Labor Review* 177, n° 198 (1930) : 181.
- [18] «the whole field of practical optics». Auerbach, *The Zeiss Works*, 31.
- [19] Mari E. W. Williams, *The Precision Makers: A History of the Instruments Industry in Britain and France* (Londres : Routledge, 1994), 41.

Modern Glass (1885-1886)

by Allain Daigle

As Kingslake provocatively declared in his 1934 article “The Development of the Photographic Objective,” lens history “divides itself naturally into two parts, the ‘old’ period from 1812 to 1886, and then the “anastigmat” period from 1886 to the present day.”^[1] 1886 does not mark the release of a particular lens. Rather, 1886 marked the year that the Zeiss Glastechnisches Laboratorium Schott und Genossen (Schott and Associates Glass Technology Laboratory) began distributing barium crown glass. This glass, and the new kinds of glass produced by the glass works, led to a significant expansion of applications that rapidly moved beyond microscopy and photography. The Glass Works helped make glass more than a raw material: it made glass a technology.

Optical Glass: Material as Technology

While Abbe succeeded in emphasizing the professional benefits of a scientifically oriented process of lens production to microscopists, another element of design became increasingly insurmountable to the working quality of scientifically designed lenses: the raw glass. In 1876, on the occasion of the exhibition *The Special Loan Collection of Scientific Instruments* in South Kensington, London, Abbe wrote an impassioned report on the state of the optical field. Abbe lamented the fact that the optician had at his disposal “a fully-developed theory and thoroughly-tested practice – everything, in fact, except suitable glasses for the construction of the necessary lenses.”^[2] Physicists were limited by the physical properties of the glass available for lens construction.

Furthermore, the market for scientific instruments in the mid-nineteenth century was quite restricted. The demand for glass industries was predominantly for window glass and glassware. Consequently, glass manufacturers had “little or no economic incentive to improve the quality of glass used in optical instruments.”^[3] Abbe suggested that improvements in the glass-making industry would benefit not only microscopy, but “all sciences and arts that need optical appliances.”^[4] He sought to link lenses to a broader ideal of using science to improve society, but found no promise or incentive for this change in the commercial industry alone. However, through significant governmental state support, Abbe was able to establish the foundation of the Glass Works with Otto Schott.

Otto Schott and the Glass Works

Abbe’s 1876 report attracted the attention of Otto Schott, a young chemist who had completed a doctorate on “Contributions to the Theory and Practice of Glassmaking” in sheet glass and was

pursuing melting experiments in his father's sheet glass factory.^[5] In response to Abbe's report, Schott wrote Abbe a letter inquiring whether some experimental lithium glass that Schott had made might have optical applications. Schott sent samples of his experimental glass to Abbe, and the two struck up a collaboration.^[6] In 1882, Schott settled in Jena, and shifted from small-scale experimental glass meltings that he had been performing in Witten to large scale experiments.

Zeiss' 1884 establishment of the *Glastechnisches Laboratorium Schott und Genossen*, otherwise known as the Glass Works, marked a profound shift in the production of precision lenses at Zeiss. In the same way that Abbe's processes affirmed professional beliefs in the scientific construction of instruments, Schott's work established optical glass as a technical material: one that was "precisely specified and reproducible in its properties."^[7] The modernization of glass was a practice of subjecting glass to increased measurement, elevating it from a material to a technology. Glass with technically specified properties – that could also be reliably reproduced! – was a key material not only for optics, but for "virtually all technology, i.e., in the end, for modern life in general."^[8] The modernization of glass was also a practice of making it possible to think of vision and technology as interchangeable. As so many early trick films demonstrated, believing in a lens' invisible mediation of vision and nature was often a revelatory experience.

Barium Crown Glass

One of the most significant glass formulas that emerged from the Glass Works was for barium crown glass. Barium crown glass enabled the construction of new types of photographic lenses as barium crown glass enabled a wider functional aperture than existing combinations of crown and flint glass allowed.^[9] The main contention at the time was that "high aperture and a wide angular field [of view] were incompatible."^[10] As a result, many existing lens designs chose between allowing chromatic aberration (a function of too strongly curved glass) or spherical aberration (a function of too weakly curved glass). Barium crown glass quickly became an optical standard for photographic lens construction because of its "absolutely clear transmission power" and freedom from chromatic and spherical aberrations."^[11] Barium crown glass, in combination with flint glass, enabled the simultaneous correction of both chromatic aberration and spherical aberration without significant compromise to the amount of light that came in through the lens

Barium crown glass was a necessary part of the design for Zeiss' "Anastigmat" lens. (As noted previously, "anastigmatic" is primarily used to describe a class of lenses that reduce both spherical and chromatic distortion. But, in this particular instance, "Anastigmat" does refer to the particular physical design of Zeiss' 1890 lens.) The physical properties afforded by barium crown glass enabled lens designers to overcome what was largely assumed to be a stable and immutable relationship between light and refraction.

Professional practice to date had suggested that the larger the relative aperture on prior lenses, the greater the necessary aberrations. This established belief – that there was a fundamental limit to the imaging capabilities that could take place at brief moments of time – had significant implications for the ability of photographers and scientists to capture images on the flexible

recording mediums that emerged in the 1890s. While “film” is often held to be a fundamental material of cinema, without a lens that could capture a distortionless image while still allowing enough light for registration on the recording surface, cinema might have looked different in its early years.

Barium crown glass enabled lens designers to create distortionless lenses, like the Zeiss Anastigmat, that many designers had previously thought to be physically impossible. In creating new kinds of optical glass, Zeiss chemist Otto Schott was hailed by the Deutsche Glastechnische Gesellschaft (the German Glass Society) as “the creator of modern scientific glass technology.”^[12] In transforming glass from a “raw” material into a “technical” material, Schott enabled glass to be systemically designed and reliably used to produce precision optical systems. Schott “allowed optics to become a technology.”^[13]

One of the reasons that the Glass Works was so dramatically successful was that, in succeeding in finding the means to reliably and repeatedly create new kinds of glass, the Glass Works met both domestic and international demands for scientifically designed optical glass. In the early nineteenth century, high quality optical glass predominantly came from the English firm The Chance Brothers, Taylor, Taylor and Hobson, and the French company Parra-Mantois.^[14] German opticians were dependent on imported optical glass for their instruments – as late as 1888, Germany imported nearly all of its optical glass from Britain.^[15] Both domestically and internationally, the Glass Works found a rich demand for the many growing forms of industrial and scientific applications of glass – and, according to a 1904 publication, the volume of optical glass production fell far behind the greater output of glass for lamps, thermometers, and other applications that required glass capable of resisting sudden and significant variations in temperature.^[16]

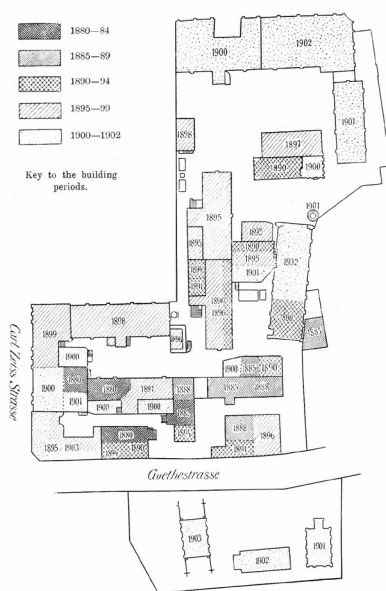


Fig. 86. Plan showing the development of the Zeiss Works.

The Zeiss Works in 1904.
[See database entry.](#)

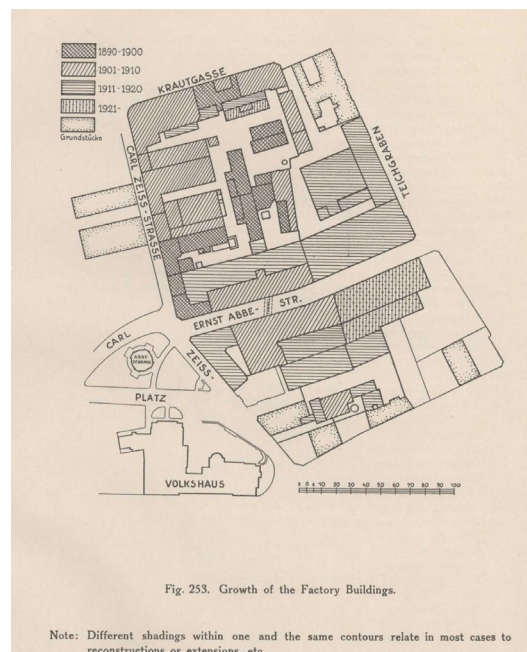


Fig. 253. Growth of the Factory Buildings.

Note: Different shadings within one and the same contours relate in most cases to reconstructions or extensions, etc.

The Zeiss Works in 1927.
[See database entry.](#)

Through the Glass Works, Zeiss became the dominant global distributor of precision optical glass. In 1877, when the firm was still a workshop, Zeiss employed 36 persons. By 1891, that number had risen to 500, and by 1900 it was employing over 1,000 employees. In 1917, at the height of World War I, Zeiss employed over 10,000.^[17] The workshop became a factory that encompassed not only microscopes, but “the whole field of practical optics.”^[18] By 1900, the German precision instrument industry more broadly included nearly 800 firms that collectively employed more than 13,500 workers. Among these firms, 125 were involved in glass manufacture.^[19]

-
- [1] Rudolf Kingslake, “The Development of the Photographic Objective,” *Journal of the Optical Society of America* 24, no. 24 (March 1934): 73. This arrangement is also seen in C.B. Neblette and Allen E. Murray’s *Photographic Lenses* (Hastings-on-Hudson: Morgan & Morgan, 1965), which begins its section on the development of the photographic lens with the subheader “Photographic Lenses Before the Anastigmat.”
 - [2] Felix Auerbach and R. Kanthack, *The Zeiss Works and the Carl Zeiss Foundation in Jena; Their Scientific, Technical and Sociological Development and Importance Popularly Described* (London: W. & G. Foyle, 1927), 26.
 - [3] David Cahan, “The Zeiss Werke and the Ultramicroscope: The Creation of a Scientific Instrument in Context,” in *Scientific Credibility and Technical Standards in Nineteenth and Early Twentieth Century Germany and Britain*, ed. Jed Z. Buchwald (Dordrecht: Kluwer Academic, 1996): 76.
 - [4] H. Hovestadt, *Jena Glass and Its Applications to Science and Art* (Jena: Fischer, 1900), 4.
 - [5] Werner Vogel, *Glass Chemistry* (Berlin: Springer-Verlag, 1985 [1994]), 4.
 - [6] “Otto Schott Joins the Company: 1879 to 1884,” Zeiss, <https://www.zeiss.com/corporate/int/history/founders/carl-zeiss/otto-schott-joins-the-company.html>.
 - [7] Peter Hartmann et al., “Optical Glass and Glass Ceramic Historical Aspects and Recent Developments: A Schott View,” *Applied Optics* 49, no. 16 (June 2010): D159.
 - [8] *Ibid.*, D157.
 - [9] The design of any photographic lens, as Kingslake explains, is subject to a mathematical expression known as the Petzval sum. Simply put, the Petzval sum is the relationship between the curvature of a lens and the power of the lens to let light onto the photographic plate. While they appear flat, all photographic images are registrations of a curve of light. Lens design curved incoming light to make the outgoing light rays register as flatly as possible on the photographic surface. Light travelling in the exact center of a lens will register more or less directly at the center of the photographic image, but the light coming from the outside of the lens curve is in focus at a different place than the light at the center. This is why many early photographs had clear focus in the center of the image but blurriness around the edges: the light coming in further away from the center was not in focus at the same focal plane as the light of the center images.
 - [10] Kingslake, *The History of the Photographic Lens*, 5.
 - [11] E.A. Schiebe, “America’s Optical Emancipation,” *Purchasing Agent*, 19 July 1919: 14.
 - [12] “Technical Note: Centenary Recognition of Dr Otto Schott,” *Journal of the Optical Society of America* 42, no. 3 (1952): 218.
 - [13] Hartmann et al., “Optical Glass,” D159.
 - [14] Stewart Wills, “How the Great War Changed the Optics Industry,” *Optics and Photonics News* 27, no. 1 (2016): 40-47, <https://doi.org/10.1364/OPN.27.1.000040>.
 - [15] R.T. Glazebrook, “The Aims of the National Physical Laboratory of Great Britain,” *Popular Science Monthly*, December 1901: 135.
 - [16] Felix Auerbach, *The Zeiss Works and the Carl Zeiss Stiftung in Jena; Their Scientific, Technical and Sociological Development and Importance Popularly Described*, trans. Siegfried F. Paul and Frederic J. Cheshire (London: W. & G. Foyle, 1904), 29.
 - [17] T.G. Spates, “Industrial Relations in the Zeiss Works,” *International Labor Review* 177, no. 198 (1930): 181.
 - [18] Auerbach, *The Zeiss Works*, 31.
 - [19] Mari E.W. Williams, *The Precision Makers: A History of the Instruments Industry in Britain and France* (London: Routledge, 1994), 41.